

# 気液二相流解析セミナーのご案内

## 【電気通信大学 大川教授 特別講演】

2014年6月10日 (火曜日 13:30~)

### プログラム

13:30~13:40 (10分)	主催者あいさつ アドバンスソフト株式会社のご紹介 専務取締役 三橋 利玄
13:40~14:25 (45分)	気液二相流の力学と数値解析 主管技師長 湊 明彦
14:25~14:45 (20分)	気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP の概要 技術第4部 第8課 課長 杉中 隆史
14:45~15:00 (15分)	(休憩)
15:00~15:30 (30分)	相変化を伴う3次元気液二相流の最新研究 ~科学技術振興機構 A-STEP 採択課題の成果~ 技術第4部 第8課 課長 杉中 隆史
15:30~16:10 (40分)	特別講演「気液二相流の課題と今後の期待」 電気通信大学 教授 大川 富雄 様
16:10~16:30 (20分)	気液二相流解析関連サービス紹介、質疑応答 営業部 営業第3課 課長 小澤 淑子

memo

 AdvanceSoft



二流体モデルによるT字管の三次元解析



気液二相流解析セミナー

# アドバンスソフトのご紹介

三橋利玄(専務取締役)

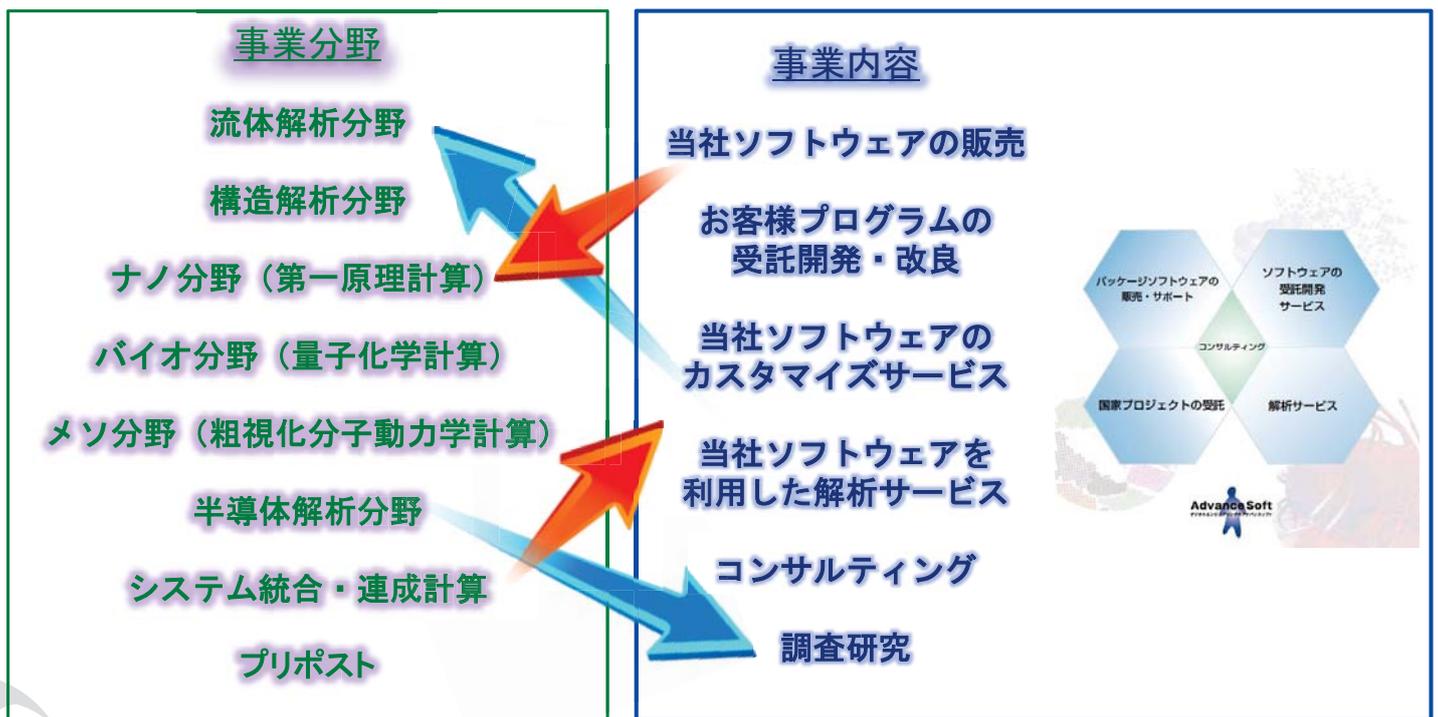
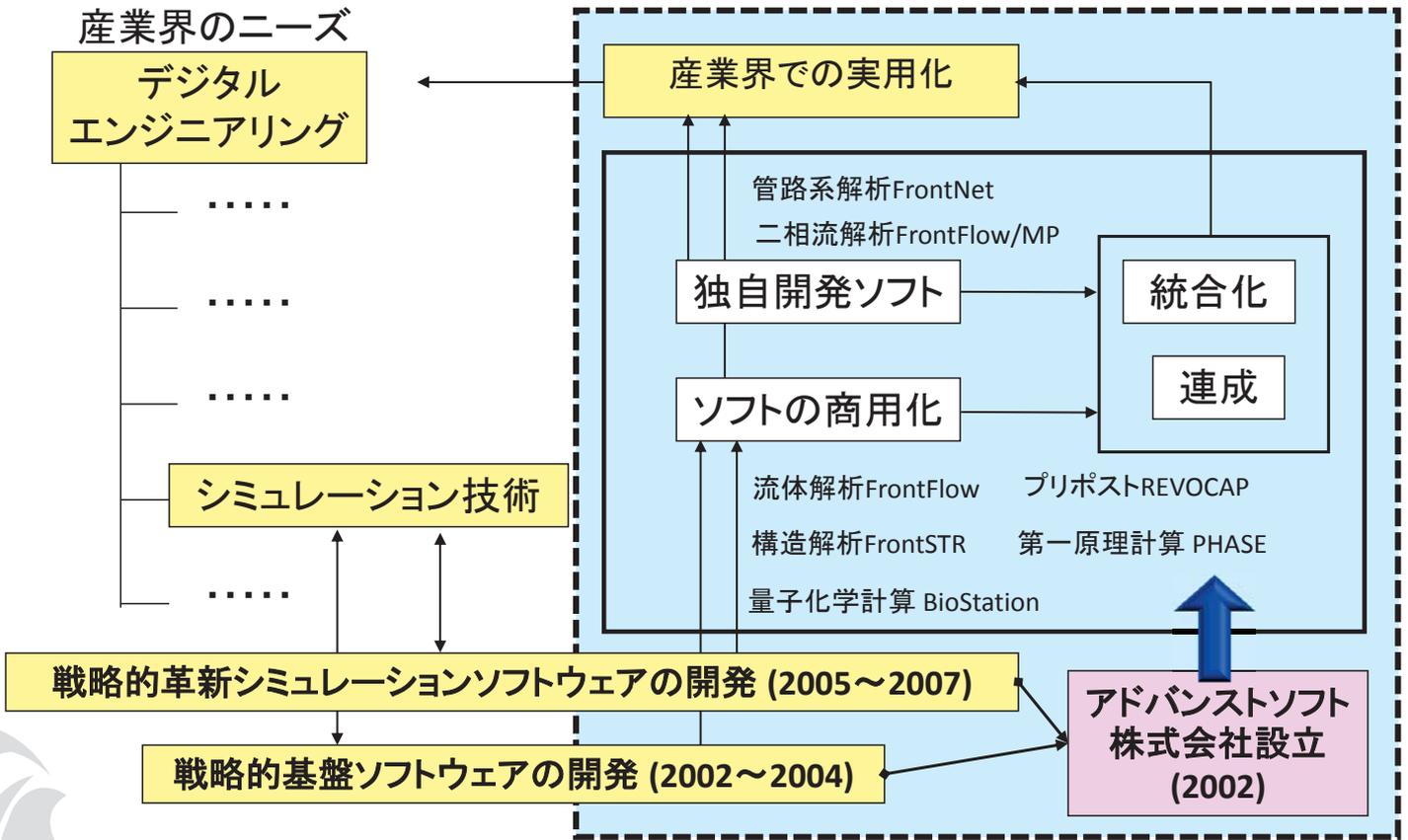
2014年6月10日 (火)

アドバンスソフト株式会社

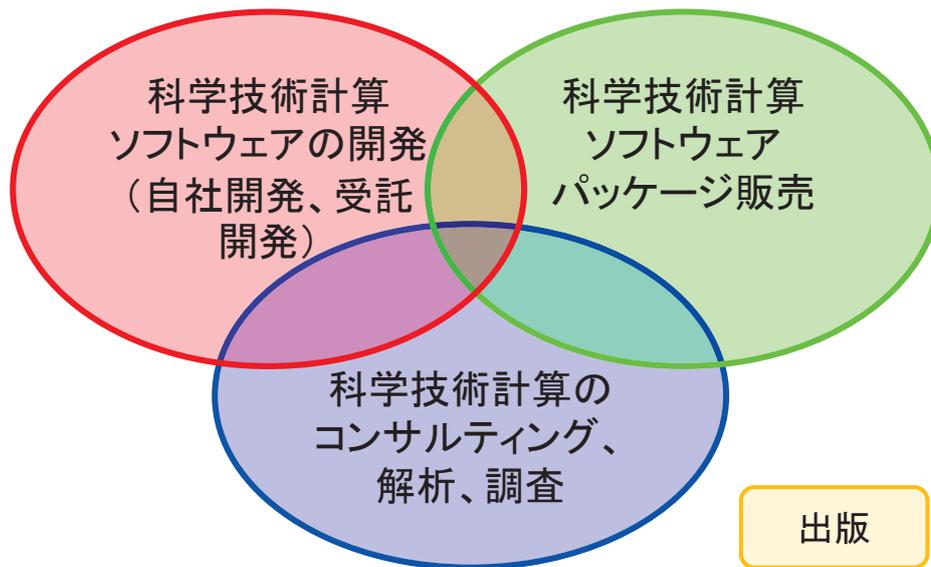
## 会社概要

<b>名 称</b> アドバンスソフト株式会社 (英文社名 AdvanceSoft Corporation)
<b>本 社</b> 〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台4-3 新お茶の水ビル17階 TEL: 03-6826-3970 FAX:03-5283-6580
<b>設 立</b> 2002年(平成14年)4月24日
<b>資本金</b> 3,724万円
<b>社員数</b> 74名(2014年5月12日現在)

事業部	部	業務概要
第一事業部	事業部付	防災シミュレーション・連成システム開発など
	技術第1部	ナノ材料の第一原理計算、量子化学計算やメソ領域、半導体・T-CAD等に係る解析・開発など
	技術第2部	<ul style="list-style-type: none"> <li>・プリポスト、可視化システム、連成システム開発など</li> <li>・J-PARCIに係わるプロジェクトの実施など</li> <li>・構造解析エンジニアリングなど</li> <li>・次世代TCADシステムの開発など</li> </ul>
第二事業部	事業部付	二相流解析および原子力安全解析など
	技術第3部	<ul style="list-style-type: none"> <li>・乱流、燃焼、化学反応等に係わる次世代流体システム開発など</li> </ul>
	技術第4部	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガス、液体パイプライン、農業用パイプライン、液体ロケットエンジン等の管路系流体解析・開発</li> <li>・火災・爆発に係わる防災リスク解析・開発など</li> <li>・次世代混相流システム開発など</li> </ul>
	技術第5部	原子力・エネルギー利用に係る安全性解析など
—	総合企画部	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンサルティングサービスの提供など</li> <li>・解析サービスの提供など</li> </ul>
営業本部	営業部	お客様窓口
東海事業所		お客様窓口

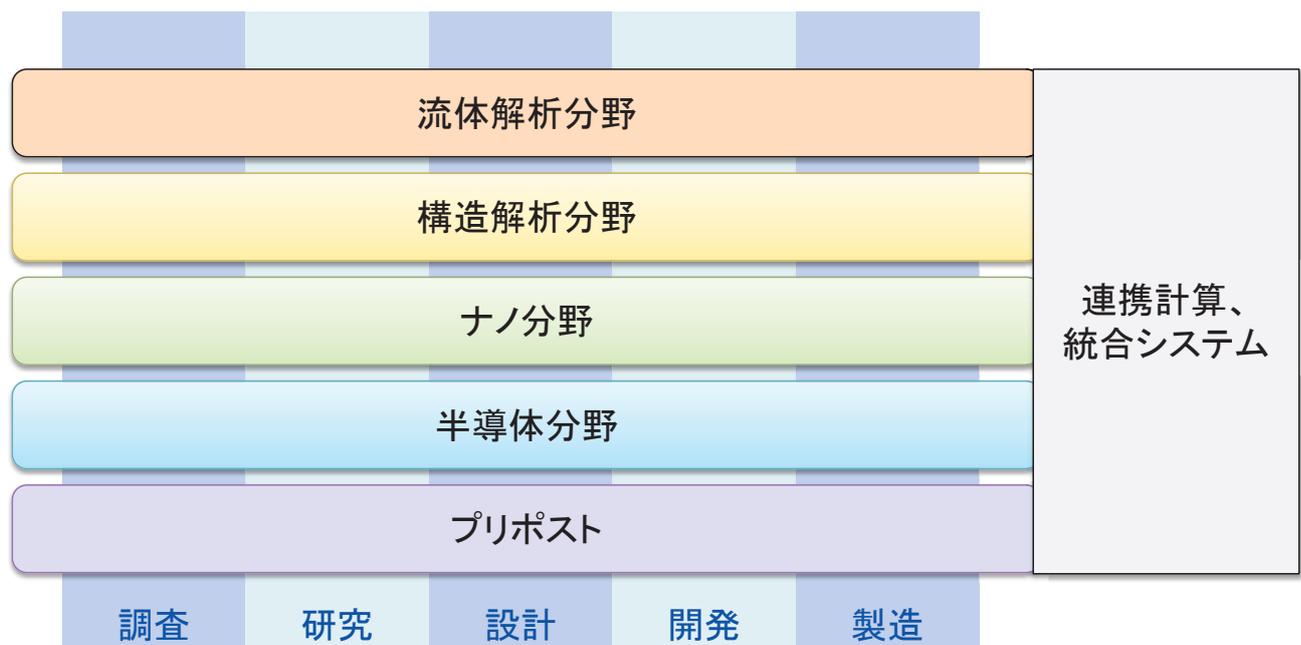


## アドバンスソフトがご提供するサービス



科学技術計算ソフトウェアの開発を基礎とした、  
科学技術計算に関する様々なソリューションをご提供します。

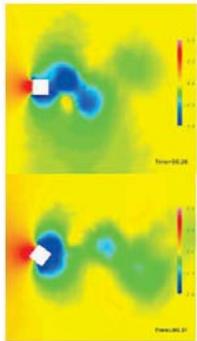
# 事業分野



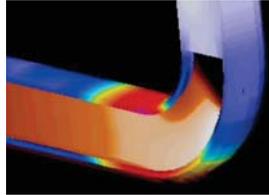
産業の主要な分野のあらゆるフェーズで直面する課題に対し、  
科学技術計算によるソリューションをご提供します。

## 流体

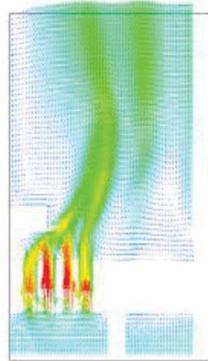
Advance/FrontFlow/red



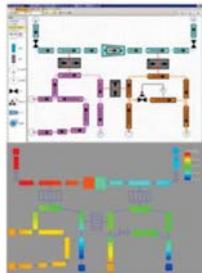
Advance/FrontFlow/FOCUS



Advance/FrontFlow/MP

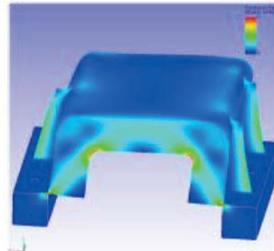


Advance/FrontNetシリーズ



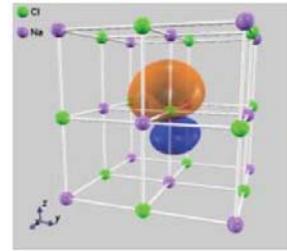
## 構造

Advance/FrontSTR



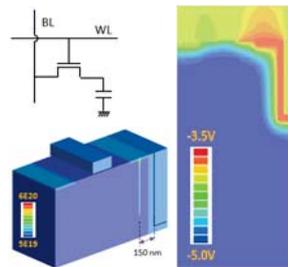
## ナノ

Advance/PHASE



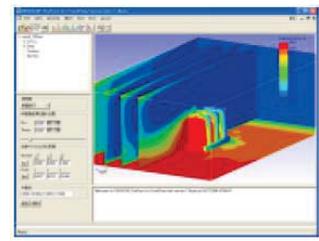
## 半導体

Advance/DESSERT



## プリポスト

Advance/REVOCAP



※上記は主要パッケージを掲載しています。詳細は弊社HP ([www.advancesoft.jp](http://www.advancesoft.jp/)) をご参照ください。

ソフトウェア名称	解析内容
Advance/FrontFlow/red	流体解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/MP	気液二相流解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/FOCUS	高速流解析・爆発解析ソフトウェア
Advance/FrontFlow/SSMP	超音速気液二相流解析ソフトウェア
Advance/EVE SAYFA	火災解析・環境安全解析シミュレータ
Advance/FrontNet	管路系1次元流体解析ソフトウェア群
Advance/FrontSTR	汎用構造解析ソフトウェア
Advance/FrontNoise	騒音解析ソフトウェア
Advance/REVOCAP	構造解析・流体解析プリポストプロセッサ
Advance/PHASE	第一原理バンド計算ソフトウェア
Advance/DESSERT	半導体デバイスシミュレータ
Advance/OCTA	ソフトマテリアル統合シミュレータ

(注)表には主要なものを挙げている。詳細は[www.advancesoft.jp](http://www.advancesoft.jp/) へ

ソフトウェア	解析方法	特徴	対象スケール
Advance/ FrontFlow/red	界面追跡法 (VOF法)	固定格子で界面挙動を直接計算 表面張力・壁面の濡れ性可	マクロ (分散相界面と大規模界面をシャープに計算)
Advance/ FrontFlow/red	Euler-Lagrangian 粒子追跡法	気泡や液滴をLagrangian粒子で追跡 気泡や液滴は質点運動	マクロ (分散相)
Advance/ FrontFlow/red	均質流モデル キャピテーションモデル	均質流モデル 計算セル内の界面分布は計算不可	マクロ (分散相界面と大規模界面を平均的に計算)
Advance/ FrontFlow/ MP	二流体モデル	二流体モデル 計算セル内の分散相と大規模界面 気泡径分布変化の計算も可	マクロ (分散相界面と大規模界面を平均的に計算)
Advance/ FrontFlow/ SSMP	圧縮性二流体モデル	超音速二相流可 二流体モデル 計算セル内の分散相と大規模界面	マクロ (分散相界面と大規模界面を平均的に計算)
Advance/ FrontFlow/ FOCUS	圧縮性均質二相流モデル キャピテーションモデル	超音速二相流可 均質流モデル	マクロ (分散相界面と大規模界面を平均的に計算)
Advance/ FrontNet/TP	1次元気液二相流管路系	1次元ネットワークモデル ドリフトフラックスモデル	マクロ (分散相界面と大規模界面を平均的に計算)
—	二相系格子ボルツマン法(LBM)	統計力学に基づきマクロ量を計算	メゾスケール
—	分子動力学法	気泡や液滴の分子レベルの挙動を 計算、非連続体に適用可能	マイクロスケール

## アドバンスソフトにおける 3次元気液二相流解析ソフトウェアの開発

1. 二流体モデルに基づく非構造格子系の沸騰・凝縮を伴う気液二相流解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/MPの第1バージョンを開発。
2. 高精度詳細気泡流解析のため、気泡合体を考慮したポピュレーション・バランス・モデルによる気泡群解析モデルを導入し、合わせて計算時間短縮のために、気泡群の運動に対する代数方程式モデルを導入。なお、乱流モデルはk-εモデルに基づく(大川先生との共同開発)。
3. 気泡群解析モデルをより高精度で相変化にも対応できるように、LES乱流モデルの導入と沸騰凝縮モデルの高度化を図る(JST/A-STEP採択課題)。
4. さらなる高速化、ロバスト性の向上を図りつつ、スラグ流、チャーン流などの多種多様な流動パターンに適用できる高機能・高精度(機構論的)3次元モデル(構成方程式)の開発を行い、欧米の流体解析ソフトウェアを凌駕する世界トップレベルの気液二相流解析ソフトウェアを目指す。

<http://www.facebook.com/advancesoft.jp>



<http://www.youtube.com/user/advancesoft>



# Advance Soft



「デジタルエンジニアリングのアドバンスソフト」



# 気液二相流の力学と数値解析

アドバンスソフト株式会社

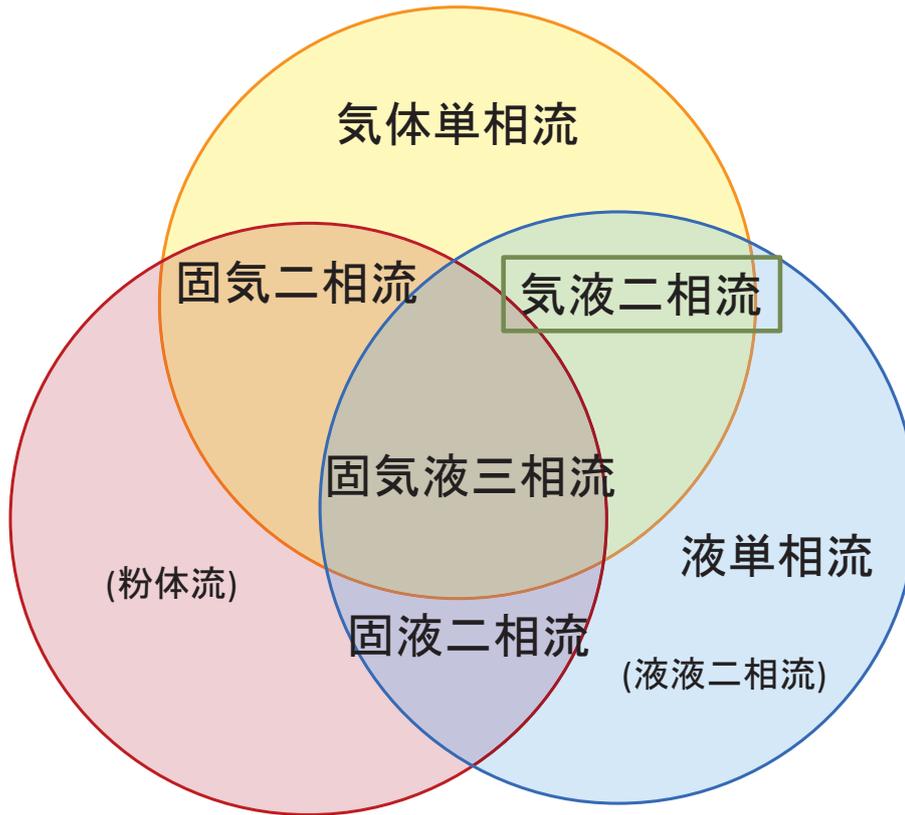
総合企画部 コンサルティングG

湊 明彦

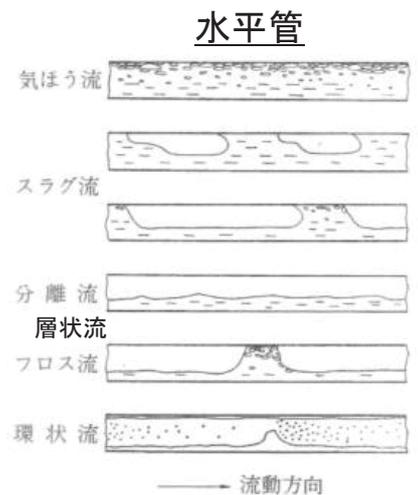
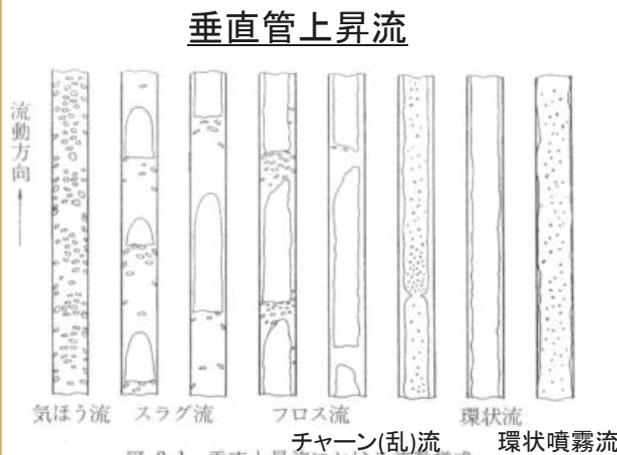
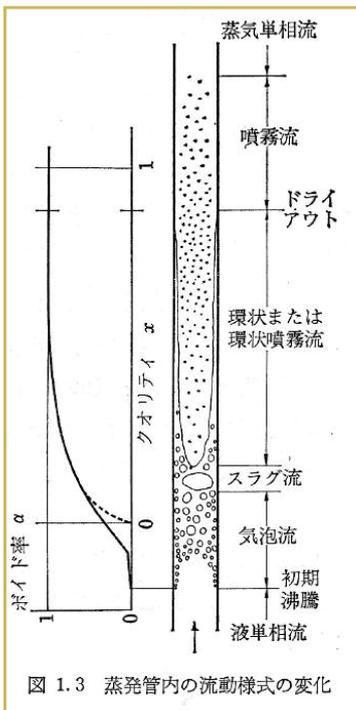
■ 気液二相流の現象

■ 気液二相流の数値解析

■ 数値解析の計算例・応用



## 流動様式 Flow Pattern



・ボイド率,  $\alpha$  Void fraction  
(気体の体積 存在比率)

・クオリティ,  $x$  Quality  
(気体の質量 通過比率)

・気体速度,  $u_g$

・液体速度,  $u_l$

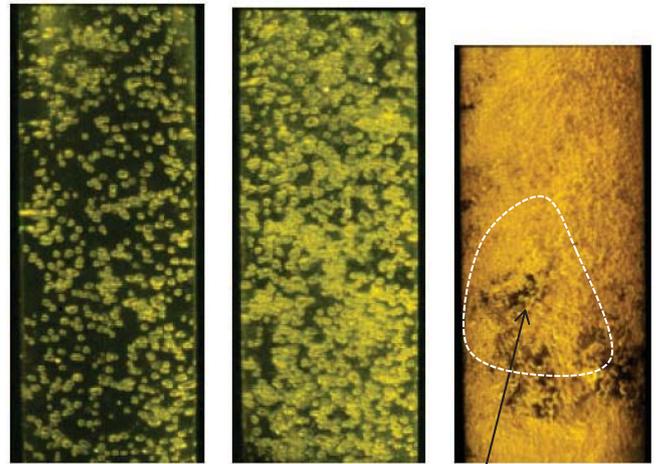
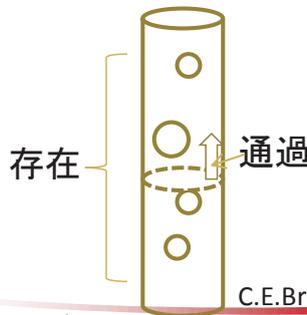


Figure 7.9. Photographs of air/water flow in a 10.2cm diameter vertical pipe (Kytömaa 1987). Left: 1% air; middle: 4.5% air; right: > 15% air.

(見えているのは壁付近だけ)

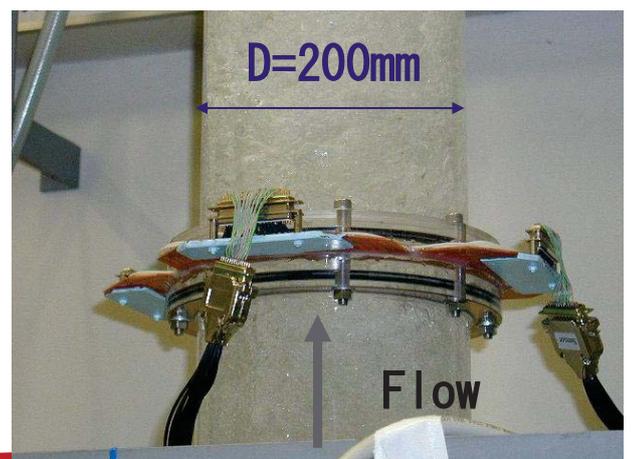
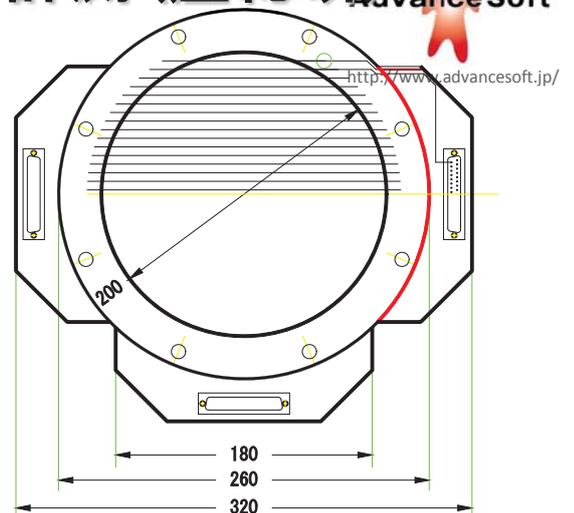
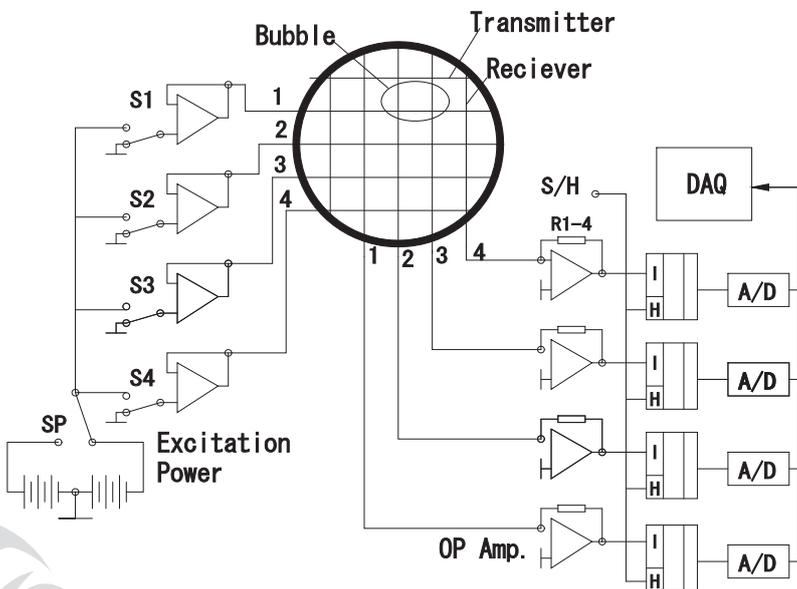
大気泡?  
(スラグslug)

C.E.Brennen: Fundamentals of Multiphase Flowsより引用

## 垂直管断面内の瞬時ボイド率計測 (産総研)

### 計測の特徴

- 16x16の計測ポイント
- 電気伝導度をボイド率に変換
- サンプリング周波数 < 10kHz
- 0.125-0.250mm SUSワイヤ使用
- 計測面距離 1.6mm
- (独Telectronics社製)



# 断面ボイド率分布過渡変化と平均分布(産総研)

(円管内径: 100mm, 水体积速度: 0.42m/s)

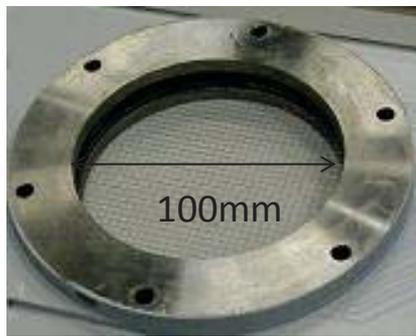
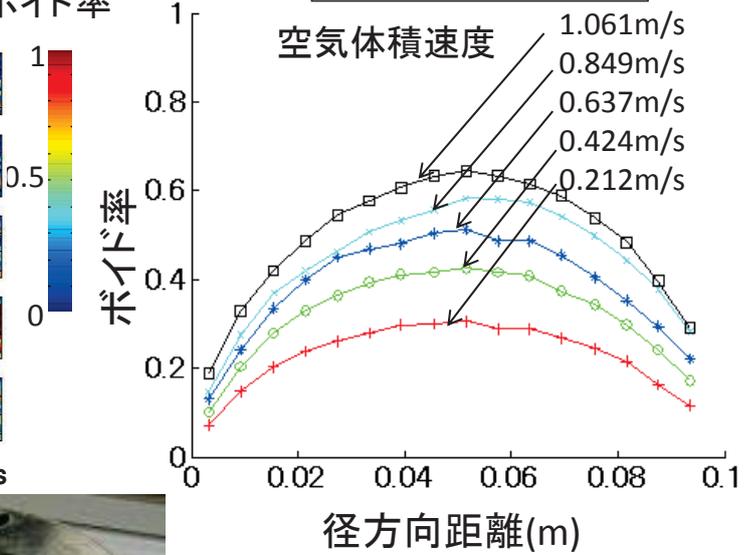
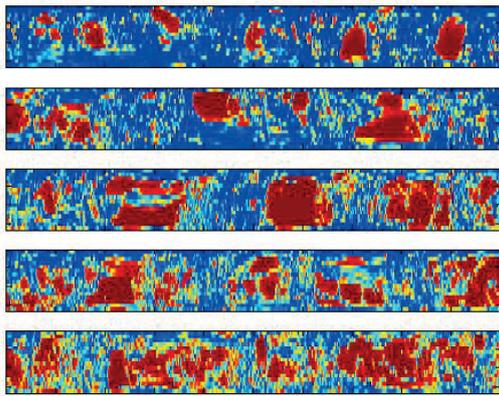
空気体積速度

過渡ボイド率

ボイド率

時間平均ボイド率

$j_g =$   
0.212m/s  
0.424m/s  
0.637m/s  
0.849m/s  
1.061m/s



ワイヤメッシュボイド計

## 気液速度の関係

通常は、一次元かつ気液並行流が前提 Co-current flow

(反対語 気液対向流 Counter-current flow)

気液速度差 (= 気液相対速度)

$$u_r = u_g - u_l$$

又は

スリップ比 (気液速度比)

$$s = \frac{u_g}{u_l} \quad (\text{通常は } s > 1)$$

Slip ratio

$u_r$  もしくは  $s$  を与えると、一方の速度を計算すれば他方の速度は自動的に決まる  
⇒ 二相流問題を(单相流+ボイド率)の問題に帰着

一般に  $f(u_g, u_l, \alpha \dots) = 0$  なる関係を、理論的、経験的に求める

クオリティxは分かっているが、ボイド率αが分からないことが多い。

→xとスリップ比sからαを求める

$$\alpha = \frac{1}{1 + s \frac{\rho_g}{\rho_l} \left( \frac{1-x}{x} \right)}$$

代表的なスリップ比評価式

Thomの式  $s = 0.93 \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.11} + 0.07 \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.561}$

Ahmadの式  $s = \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.205} \left( \frac{GD}{\mu_l} \right)^{-0.016}$

Smithの式  $s = e + (1-e) \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{1/2} \left\{ \frac{1 + e \frac{(1-x)\rho_g}{x\rho_l}}{1 + e \frac{(1-x)}{x}} \right\}^{1/2}$  (標準値e=0.4)

## ドリフトフラックス理論

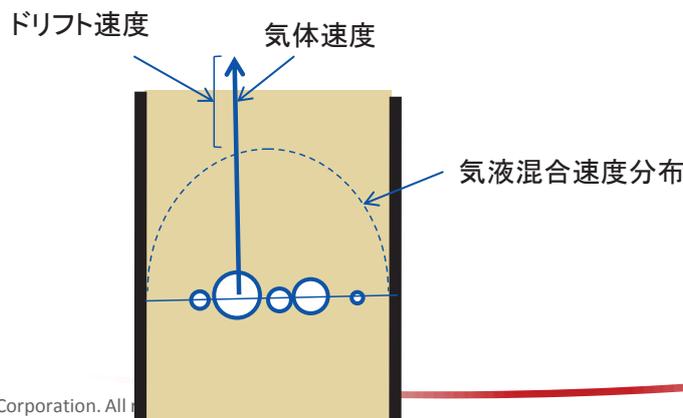
(より新しい気液速度の関係\*)

\*Zuber-Findlay(1965)

$$u_g = C_0 \left\{ \alpha u_g + (1-\alpha) u_l \right\} + \bar{V}_{gj}$$

分布パラメータ      気液混合速度      ドリフト速度

この2つの値を与えると  
気液速度の関係が決まる



$$\left. \begin{aligned}
 \text{気泡流: } C_0 &= 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \\
 v_{Gj} &= (1-\alpha)^{1.5} \sqrt{2} \left\{ \frac{\sigma g (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right\}^{1/4}
 \end{aligned} \right\} \\
 \left. \begin{aligned}
 \text{スラグ流: } C_0 &= 1.2 \\
 v_{Gj} &= 0.35 \left\{ \frac{g (\rho_L - \rho_G) D}{\rho_L} \right\}^{1/2}
 \end{aligned} \right\} \\
 \left. \begin{aligned}
 \text{チャーン流: } C_0 &= 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \\
 v_{Gj} &= \sqrt{2} \left\{ \frac{\sigma g (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right\}^{1/4}
 \end{aligned} \right\} \\
 \left. \begin{aligned}
 \text{環状流: } C_0 &= 1 \\
 v_{Gj} &= \frac{1-\alpha}{\alpha + 4\sqrt{\rho_G/\rho_L}} \left\{ j_T + \sqrt{\frac{g (\rho_L - \rho_G) D (1-\alpha)}{0.015 \rho_L}} \right\}
 \end{aligned} \right\} \\
 \left. \begin{aligned}
 \text{噴霧流: } C_0 &= 1 \\
 v_{Gj} &= (1-\alpha) \sqrt{2} \left\{ \frac{\sigma g (\rho_L - \rho_G)}{\rho_G^2} \right\}^{1/4}
 \end{aligned} \right\}$$

(\*石井護, 米Purdue大教授)

## 水平管の流動様式マップ

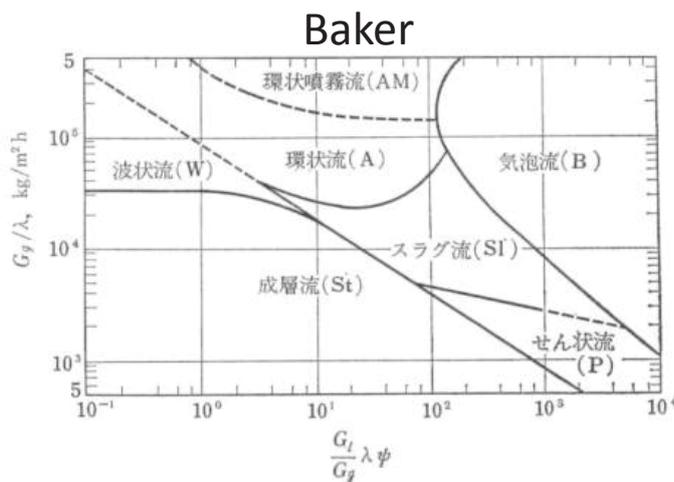


図 1.4 Baker の流動様式線図

$$\left. \begin{aligned}
 \lambda &= \left[ \left( \frac{\rho_g}{\rho_A} \right) \left( \frac{\rho_l}{\rho_W} \right) \right]^{1/2} \\
 \psi &= \frac{\sigma_W}{\sigma} \left[ \frac{\mu_l}{\mu_W} \left( \frac{\rho_W}{\rho_l} \right)^2 \right]^{1/3}
 \end{aligned} \right\}$$

$\sigma$ : 表面張力,  $\mu$ : 粘性係数,  $\rho$ : 密度  
 $W$ : 水,  $A$ : 空気,  $g$ : 気体,  $l$ : 液体

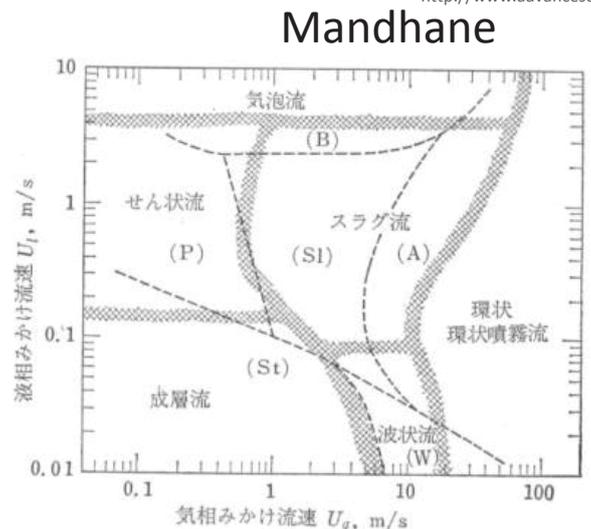


図 1.5 MANDHANE の流動様式線図

$G$ : 質量速度  
 $J$  又は  $U$ : 体積速度又はみかけ速度

植田辰洋「気液二相流」より引用

## ■ 気液二相流の現象

## ■ 気液二相流の数値解析

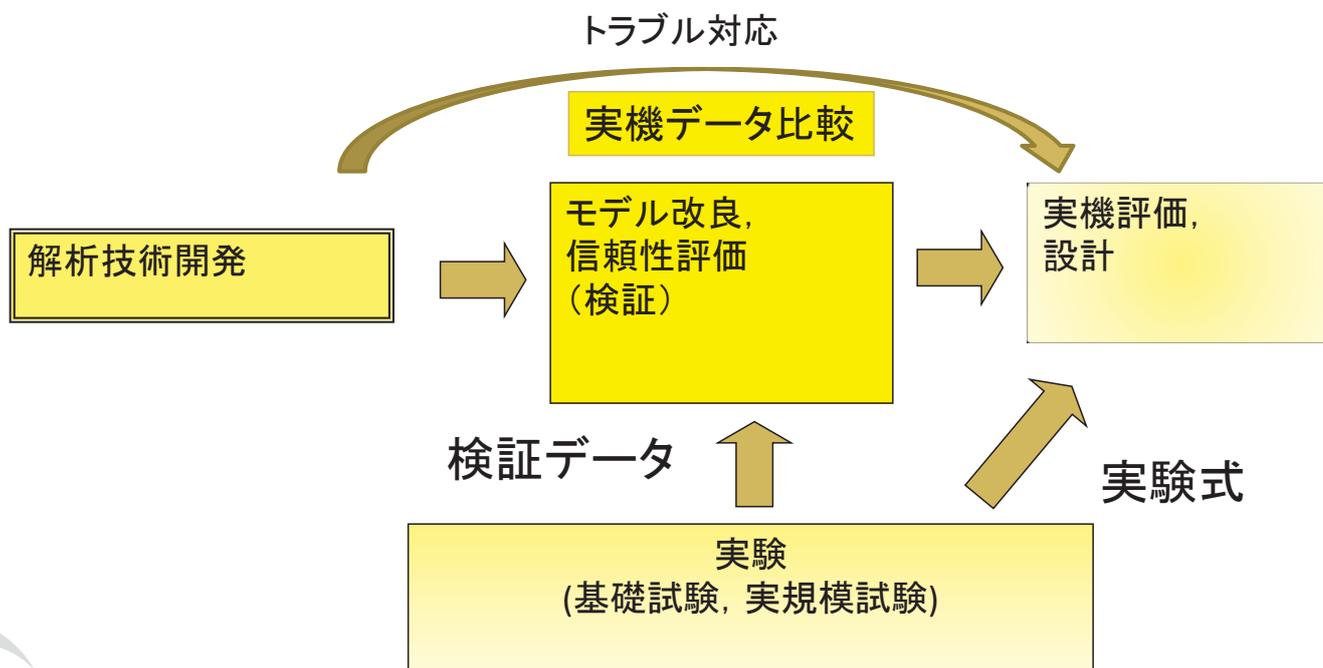
## ■ 数値解析の計算例・応用

## 気液二相流解析の難しさ

- 一般の気液二相流は時間的・空間的に激しく変動する複雑現象
- 常温常圧の水と空気の密度は1000倍の違いがあり、さらに大気圧で沸騰する水と蒸気は2000倍近い相違
- 大きく異なる性質を持つ二種類の流体(気体と液体)が共存する気液二相流は密度ばかりでなく圧力や速度も本質的に偏りがある非均質流動
- 非均質の原因となっている気液界面の形状が固定されておらず、流れに従って時間的・空間的に変化し続けることでさらに複雑な現象が発生
- 特定の流動条件において得られた経験が他の流動条件には通用しないなど、気液二相流の流動現象の一般性のある把握が困難

- 気液二相流の研究は多くの産業分野や防災分野で研究
- 特に原子力開発に伴って大規模な実験が行われ解析技術も進歩
- 設計に必要な流動条件に限られた大局的かつ平均的な挙動を対象としていたので、気液二相流固有の複雑さは殆ど無視（しかし、気液二相流のマクロ現象を流体力学や熱力学の基礎理論と経験則を組み合わせ、実験条件でカバーされた範囲に限れば実用的な予測を可能にした気液二相流力学の体系は気液二相流現象の理解と解析において極めて有用）
- 気液二相流固有の非均質・間欠的な複雑流動を直接数値解析を行う技術開発の進歩
- 数値計算技術も多くの問題があり、一つの方法で万全な予測や理解は期待できないので、これらの知識を総動員して現実の気液二相流現象に迫る必要

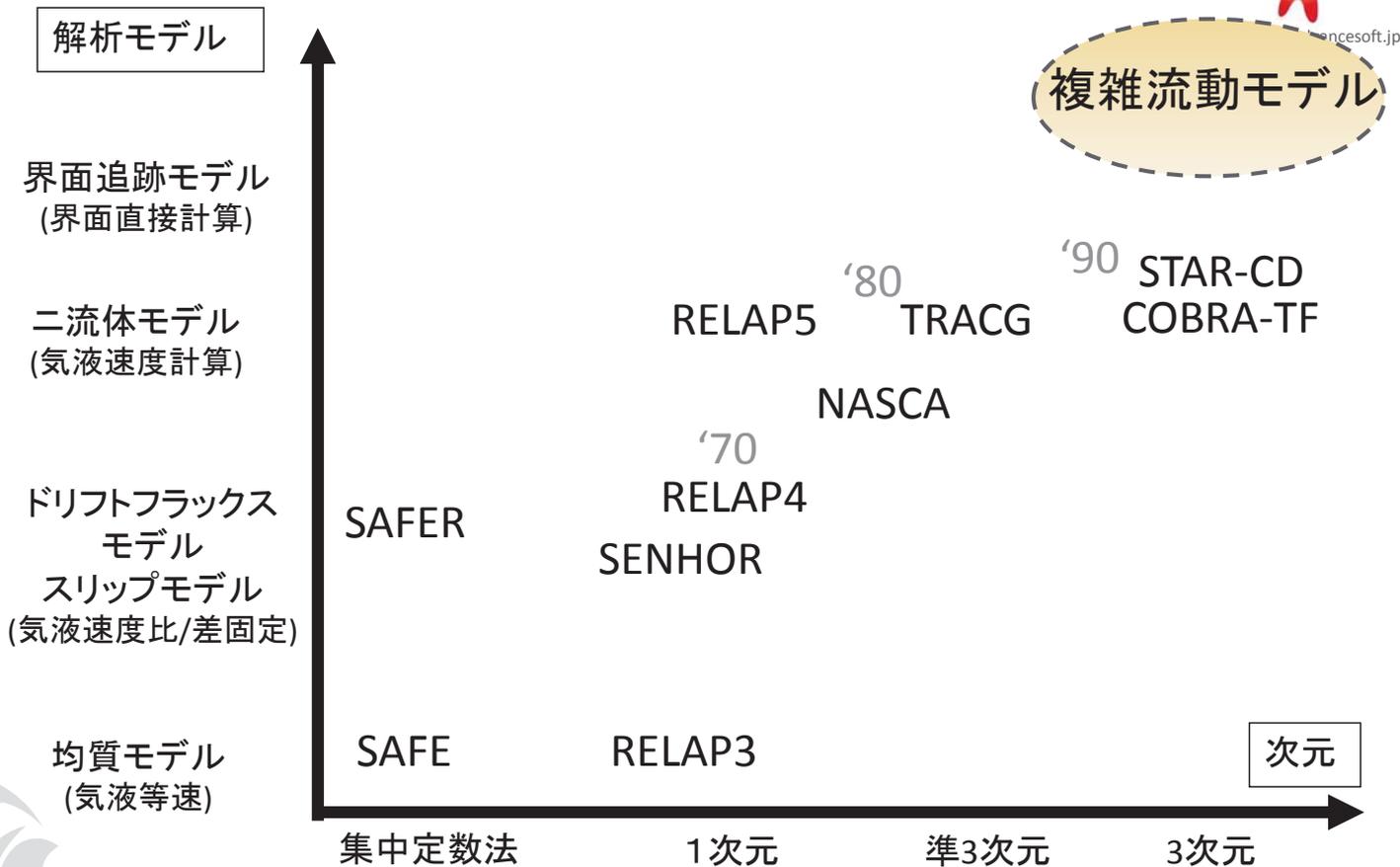
## 解析技術開発から実用化までの流れ



# 原子力分野における気液二相流解析技術の進歩

AdvanceSoft

http://www.advancesoft.jp/



次元

集中定数法

1次元

準3次元

3次元

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

17

## 二流体モデルとVOF法の比較

AdvanceSoft

http://www.advancesoft.jp/

手法	二流体モデル (平均化法)	VOF法 (界面追跡法)
特徴	非均質・間欠性を消去した 準定常, 巨視的解析	非均質・間欠性を扱う 微視的解析
取り扱える 解析対象	原子カプラントの大規模 システムの解析が可能 ⇒ 原子力研究に適合	小規模流路解析に限定
構成方程式	非均質・間欠特性効果 を反映する高精度の 構成方程式が必要	構成方程式は基本的 に不要

二流体モデル: 速度の異なる気液の混合流を解析

VOF法: 界面とその両側の気体と液体の流れを解析

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

17

18

## 平均化法

二流体モデル FrontFlow/MP, ACE 3D, PORTOS

高精度二流体モデル (拡張二流体モデル, 改良二流体モデル)

## 界面追跡法

VOF法, MARS, TP-FIT, SP-VOF

Level Set法

CIP法

## 粒子法

MPS法

SPH法

## 統計法

格子ボルツマン法

: 汎用性が高い手法

## 二流体モデルの意味

気液二相流の非均質・間欠特性を消去し、  
(局所的に)準定常な連続体として数値解析を行う

相分布の平均化  
(時間 $\Delta T$ と体積 $\Delta V$ 内の平均値)

ボイド率の定義

$$\alpha_g(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\Delta V} \frac{1}{\Delta T} \int_{\Delta V} \int_{t-\frac{\Delta T}{2}}^{t+\frac{\Delta T}{2}} X_g(\mathbf{r}', t') d\mathbf{r}' dt'$$

### Drewの相関数

$$X_k(\mathbf{r}_2, t) = 0$$

$\mathbf{r}_2$

相k

$\mathbf{r}_1$

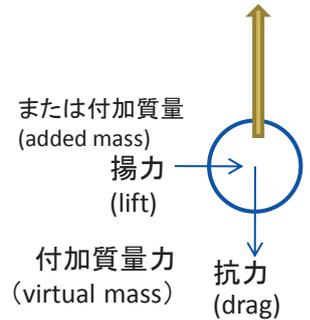
$$X_k(\mathbf{r}_1, t) = 1$$

原点

# 単相流の基礎式

質量保存則  $\frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0$

運動量保存則  $\frac{\partial}{\partial t} \rho \mathbf{u} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla P = \rho \mathbf{g} + (\nabla \cdot \mu \nabla) \mathbf{u}$



$$F_{k,k'}^{(i)} + F_{k',k}^{(i)} = 0$$

$$F_{k,k'}^{(i)} = F_{k,k'}^{(drag)} + F_{k,k'}^{(vm)} + F_{k,k'}^{(lift)} + F_{k,k'}^{(bu)}$$

# 二相流の一般基礎式(二流体モデル)

質量保存則  $\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k = 0$

運動量保存則  $\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k + \alpha_k \nabla P = \alpha_k \rho_k \mathbf{g} + (\nabla \cdot \varepsilon \alpha_k \rho_k \nabla) \mathbf{u}_k + \mathbf{F}_{k,k'}^{(i)}$

渦粘性係数  $\varepsilon = (\text{乱流渦効果}) + (\text{気液相互攪拌効果})$

- ・混合長モデル
- ・k-εモデル
- ・LESモデル

# 非圧縮性単相流数値解法SMAC法の概要

前タイムステップ(t)の速度分布

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} + \rho \mathbf{u} \nabla \cdot \mathbf{u} = -\nabla P + \mu \Delta \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad \text{NS方程式を使って}$$

仮の圧力場を用いた新タイムステップ(t+Δt)の仮の速度分布を求める

P: 一様又は前タイムステップの圧力場

Yes  $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0?$  No

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \delta \mathbf{u} = -\nabla \delta P$$

ポアソン方程式の  
反復計算

$$\begin{aligned} \mathbf{u} + \delta \mathbf{u} &\Rightarrow \mathbf{u} \\ P + \delta P &\Rightarrow P \end{aligned}$$

次のタイムステップへ

二流体モデル  
基礎式

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k = 0$$

質量保存則

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k - \alpha_k \nabla P = \alpha_k \rho_k \mathbf{g} + (\nabla \cdot \varepsilon \alpha_k \rho_k \nabla) \mathbf{u}_k + \mathbf{F}_{k,k'}^{(i)}$$

運動量保存則

連続の式  $\nabla \mathbf{j} = \nabla \{ \alpha \mathbf{u}_g + (1-\alpha) \mathbf{u}_\ell \} = 0$

付加質量力を考慮

$$\mathbf{F}_{k,k'}^{(vm)} = -\rho_{vm} \left( \frac{d}{dt} \mathbf{u}_k - \frac{d}{dt} \mathbf{u}_{k'} \right)$$

速度, 圧力補正式  $\alpha_k \rho_k \frac{d}{dt} \mathbf{u}_k + \rho_{vm} \left( \frac{d}{dt} \mathbf{u}_k - \frac{d}{dt} \mathbf{u}_{k'} \right) = \alpha_k \nabla P$

K, k'相の連立方程式

$$\begin{cases} (\alpha_k \rho_k + \rho_{vm}) \frac{d}{dt} \delta \mathbf{u}_k - \rho_{vm} \frac{d}{dt} \delta \mathbf{u}_{k'} = \alpha_k \nabla \delta P \\ -\rho_{vm} \frac{d}{dt} \delta \mathbf{u}_k + (\alpha_{k'} \rho_{k'} + \rho_{vm}) \frac{d}{dt} \delta \mathbf{u}_{k'} = \alpha_{k'} \nabla \delta P \end{cases}$$

以上より,  $\rho^{(eff)} \frac{\partial}{\partial t} \delta \mathbf{j} = -\nabla \delta P \Rightarrow$  密度  $\rho^{(eff)}$  の单相流と近似してSMAC法を適用

ここで  $\rho^{(eff)} = \frac{\alpha s^* \rho_g + (1-\alpha) \rho_\ell}{\alpha s^* + (1-\alpha)}$   $s^* = \frac{\frac{d}{dt} \delta u_g}{\frac{d}{dt} \delta u_\ell} = \frac{\rho_{vm} + \alpha(1-\alpha) \rho_\ell}{\rho_{vm} + \alpha(1-\alpha) \rho_g}$

気液加速度の比(加速度スリップ)の解

## 構成方程式の例

(Constitutive equations)

$$\mathbf{F}_{k,k'}^{(i)} + \mathbf{F}_{k',k}^{(i)} = 0$$

基礎式

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k + \nabla \cdot \alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k - \alpha_k \nabla P = \alpha_k \rho_k \mathbf{g} + (\nabla \cdot \varepsilon \alpha_k \rho_k \nabla) \mathbf{u}_k + \mathbf{F}_{k,k'}^{(i)}$$

$$\mathbf{F}_{k,k'}^{(i)} = \mathbf{F}_{k,k'}^{(drag)} + \mathbf{F}_{k,k'}^{(vm)} + \mathbf{F}_{k,k'}^{(lift)} + \mathbf{F}_{k,k'}^{(bu)}$$

界面を通じた気液間の相互作用

(評価は構成方程式と称する経験式, 半理論式に依存)

例えば

付加質量力  $\mathbf{F}_{k,k'}^{(vm)} = -\rho_{vm} \left( \frac{d}{dt} \mathbf{u}_k - \frac{d}{dt} \mathbf{u}_{k'} \right)$

$$\rho_{vm} = c(1-\alpha) \rho_\ell \quad c \approx 0.5$$

気液間抗力  $\mathbf{F}_{k,k'}^{(drag)} = \frac{\alpha(1-\alpha) \sqrt{g(\rho_\ell - \rho_g)}}{v_{gj}^2} |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_\ell| (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_\ell)$  (Modified Andersenの式)

気泡攪拌による  
渦粘性係数

$$\varepsilon = \alpha(1-\alpha) \lambda_{Taylor} v_{gj}$$

(Modified Satoの式)

# 二流体モデル解析の信頼性向上の二つの方法

種々の流動条件に  
適用できる一般化  
汎用構成方程式

非均質・間欠特性の  
部分的解析



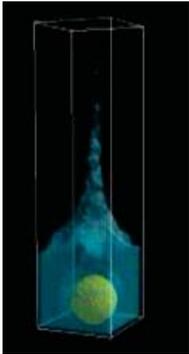
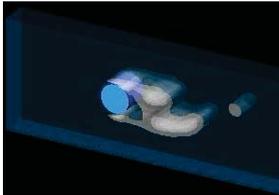
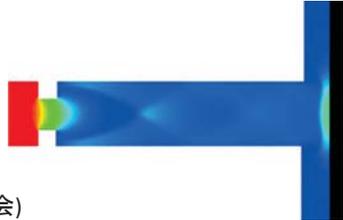
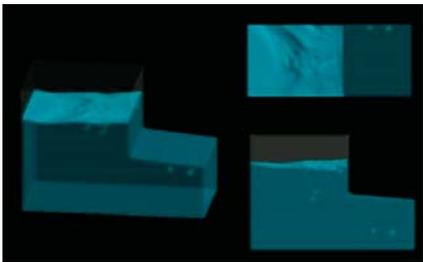
気液二相流実験  
データベースの構築  
  
⇒幅広い条件の実規模  
試験が必要  
(高コスト)

微視的界面追跡機能を持つ  
二相流モデルの開発  
  
⇒実規模試験の一部  
を解析で代替

高精度構成方程式

高精度二流体モデル

# 気液二相流解析コードシステム

	非圧縮性	圧縮性
二流体モデル (気液速度差考慮)	 <p>スラグ流 (日米二相流シンポ)</p>  <p>プール中固体球落下 (混相流学会)</p>	 <p>円柱後流 キャビテーション (混相流学会)</p>  <p>オリフィス ミスト噴流の 衝突 (原子力学会)</p>
VOF法 (気液等速, 詳細界面追跡)	 <p>自由液面からの気泡巻き込み (機械学会計算力学部門講演会)</p>	 <p>高圧気泡群 の膨張と破裂 (国際地球物理・測地学会)</p>

# ■ 気液二相流の現象

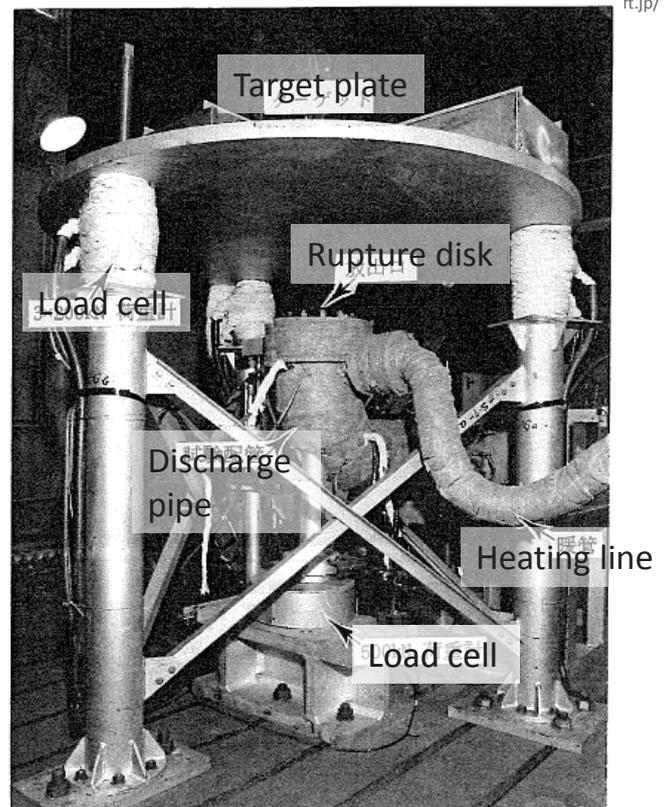
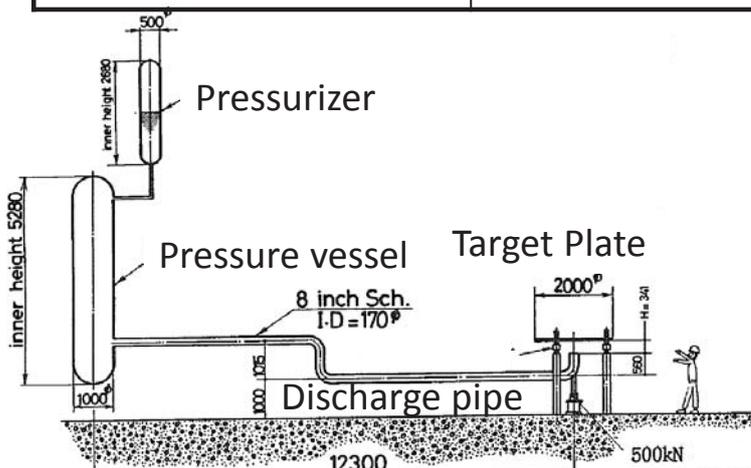
# ■ 気液二相流の数値解析

# ■ 数値解析の計算例・応用

## 二相ジェット荷重試験装置 (旧原研)

Experimental conditions

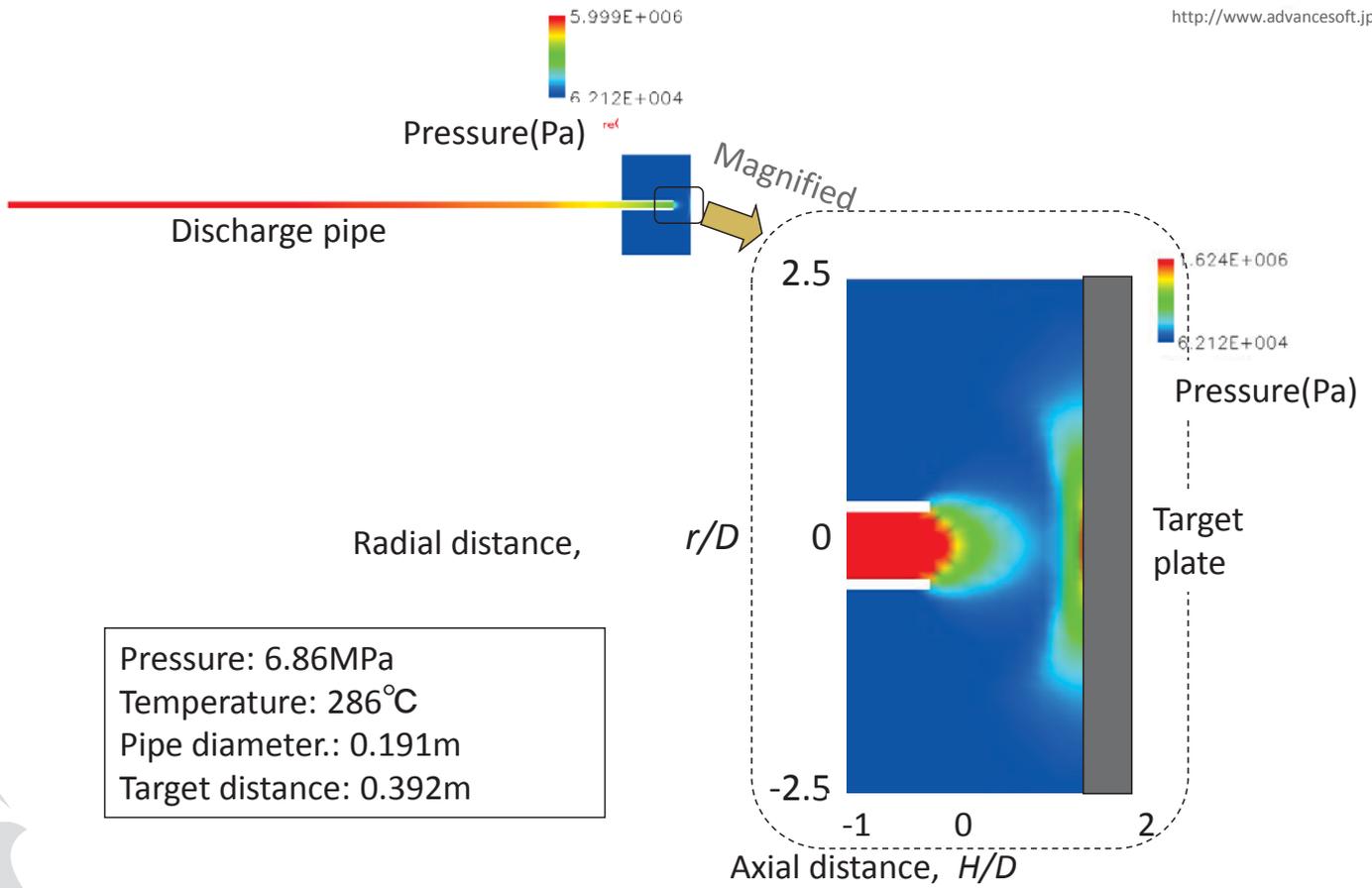
Reactor type		BWR	PWR
Water	Pressure (MPa)	6.8	15.5
	Temperature (°C)	285	325
Pipe diameter, $D$ (mm)		90-190	
Distance to target, $H/D$		1, 2, 5, 18	



\*Isozaki, T., Miyazono, S., "Experimental Study of Jet Discharge Test Results under BWR/PWR Loss of Coolant Accident Conditions," Nucl. Eng. Design, 96, pp.1-9 (1988)

# 衝突板近傍圧力分布の解析結果

<http://www.advancesoft.jp/>



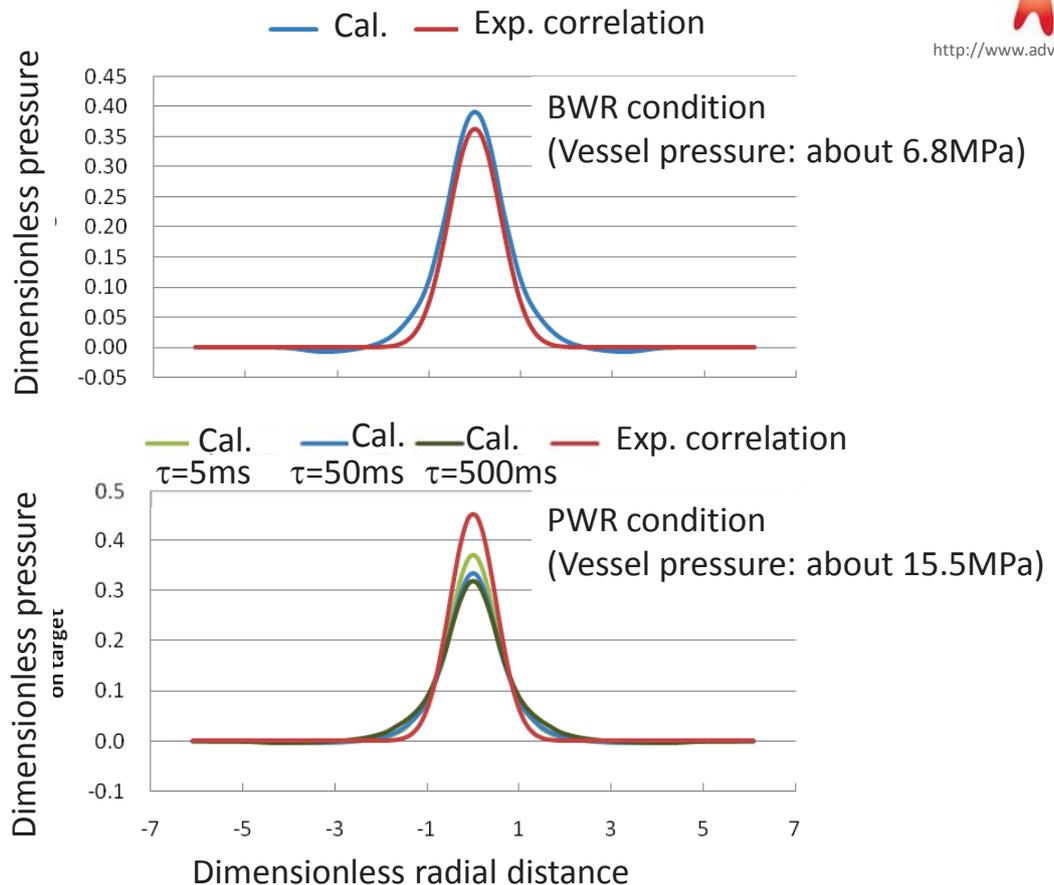
Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved. \*H. Utsumi, No. NP13P1368, NURETH-13(2009)

29

## 衝突板上の圧力分布

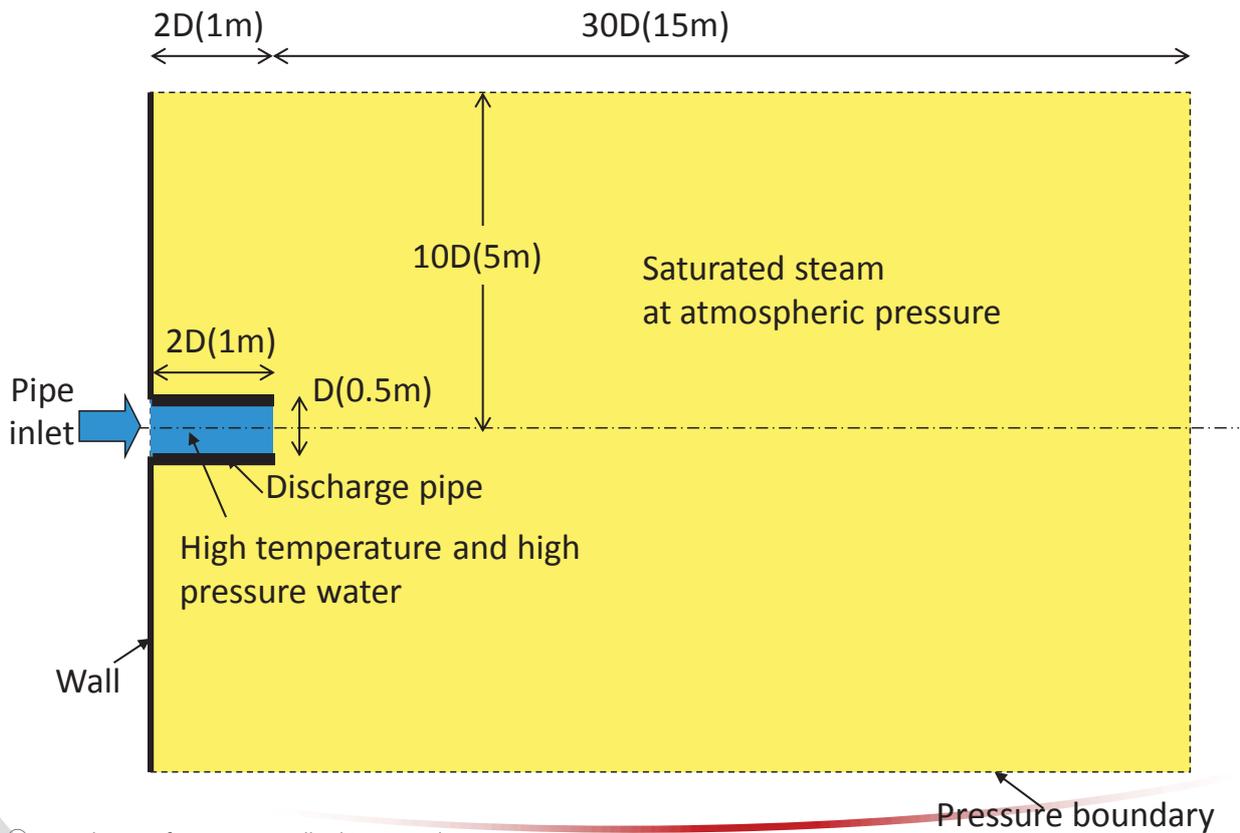


<http://www.advancesoft.jp/>



Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

30 23

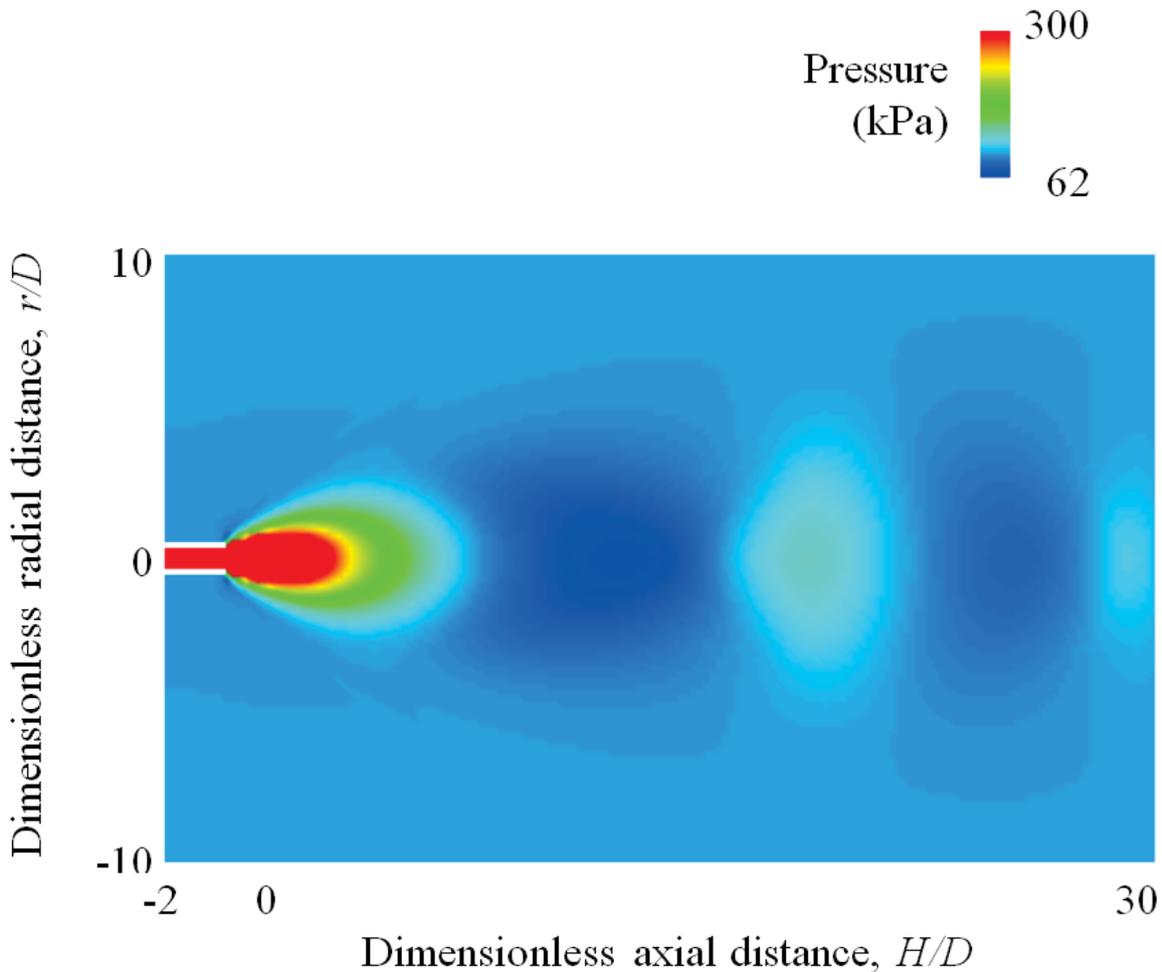


Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

31

## 自由噴流中の圧力分布解析結果 (PWR condition)

Soft  
[advancesoft.jp/](http://advancesoft.jp/)



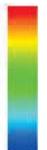
Copyright ©

32

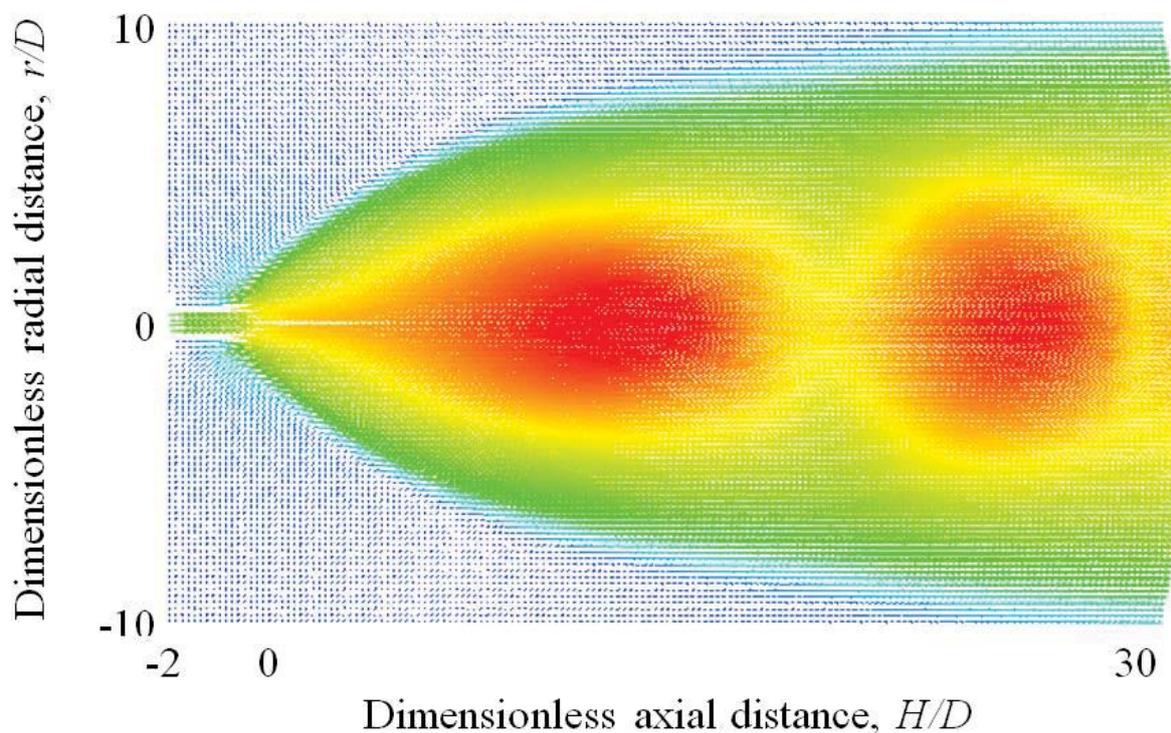
24

# 自由噴流中の速度分布解析結果 (PWR condition)

t

Volumetric velocity (m/s)  274  
7

 v.advancesoft.jp/



Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

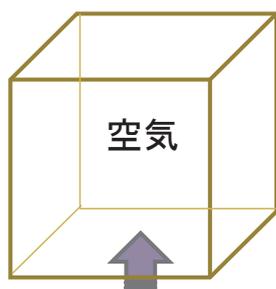
33

## 高粘性流体の自由液面流

 AdvanceSoft

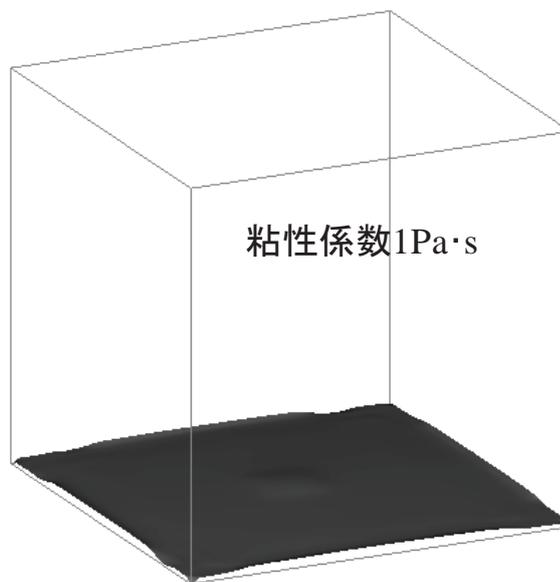
<http://www.advancesoft.jp/>

解析領域 0.5m立方  
密度 1000kg/m<sup>3</sup>



粘性流体湧出し(0.1m/s)  
(7.2cm平方開口から6秒間)

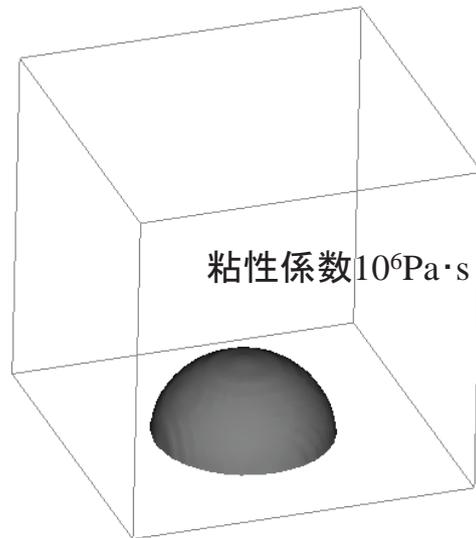
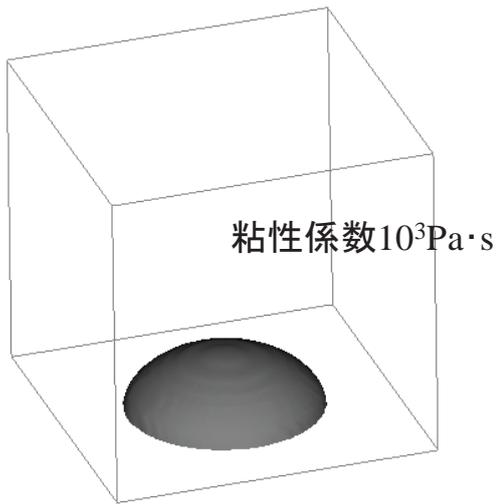
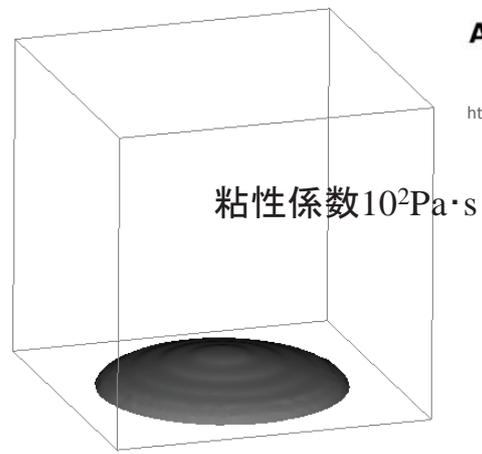
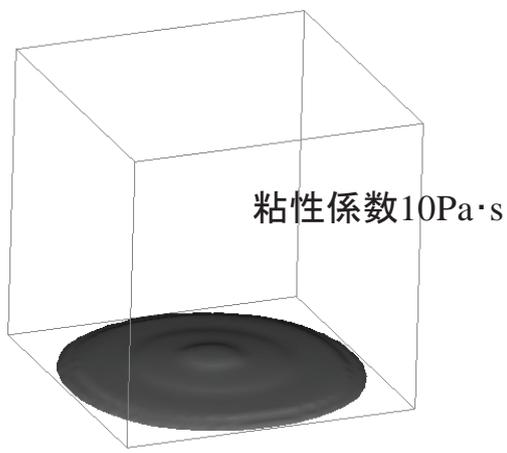
粘性係数: 1~10<sup>6</sup>Pa·s



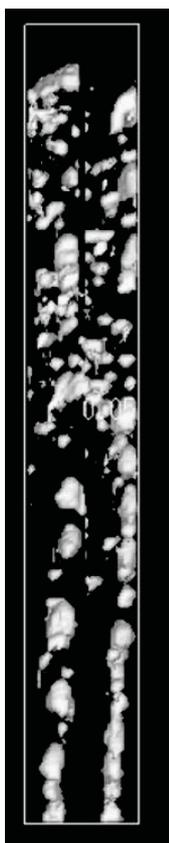
Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

34

25



## 動画による計算例の紹介



気泡流



スラグ流



インクジェット



衝突液滴

## ■原子力

- ・燃料集合体
- ・セパレータ
- ・再処理蒸発缶
- ・蒸気発生器, 給水加熱器
- ・安全評価(超音速二相流, シビアアクシデント)

## ■機械

- ・空調冷媒系
- ・二相流ポンプ
- ・自動車燃料インジェクタ
- ・気泡反応塔
- ・キャビテーション
- ・船舶の碎波
- ・ポンプ機場水路
- ・安全評価(水蒸気爆発, 水撃)

## ■防災

- ・火山噴火
- ・津波
- ・洪水, 高潮
- ・土石流, 液状化

# 結 言

### (現状)

従来の時間・空間平均化した準定常現象を対象とした解析から非均質・間欠性を直接取り扱う過渡三次元解析への移行過程

### (課題)

高精度二流体モデル/界面追跡モデルの確立

- ・標準アルゴリズムの確立
- ・大規模, 高速計算技術
- ・機能拡大と検証

(沸騰/凝縮, 化学反応, 固体連成, 液滴・気泡・液膜微視的モデル)

- ・解析結果の表現技術

(グラフィック, 動画)

### (展開)

解析技術の普及と適用実績の蓄積



# 気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MPの概要

技術第4部 杉中 隆史

2014年6月10日 (火)  
アドバンスソフト株式会社



Advance/FrontFlow/MPは、科学技術振興機構 (JST) 様から資金援助をいただいて、  
世界トップの実用的な汎用気液二相解析ソフトを目指して開発が行われています。

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

1

## 内容

- Advance/FrontFlow/MPとは？
- Advance/FrontFlow/MPの特長
- Advance/FrontFlow/MPの構成
- Advance/FrontFlow/MPの解析機能
- Advance/FrontFlow/MPの解析実績
- 解析事例1 沸騰解析
- 解析事例2 沸騰凝縮と固体内熱伝導解析
- 解析事例3 凝縮解析
- 解析事例4 蒸発解析
- 解析事例5 自由表面解析
- 解析事例6 気泡合体解析
- 解析事例7 固体凝集解析
- 今後の開発計画

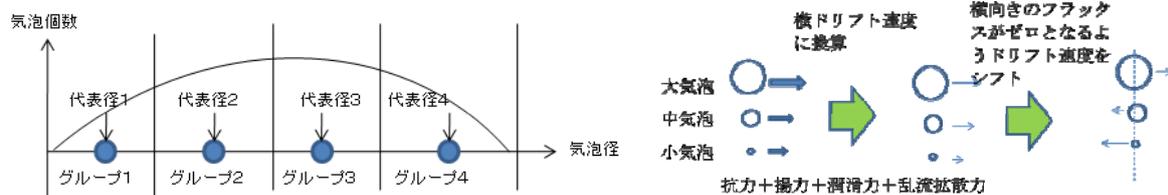


Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

2

# Advance/FrontFlow/MPとは？

1. 二流体モデルに基づく非構造格子系の沸騰・凝縮を伴う気液二相流解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/MPの第1バージョンを開発。
2. 高精度詳細気泡流解析のため、気泡合体を考慮したポピュレーション・バランス・モデルによる気泡群解析モデルを導入し、合わせて計算時間短縮のために、気泡群の運動に対する代数方程式モデルを導入。なお、乱流モデルは $k-\varepsilon$ モデルに基づく(大川先生との共同開発)。



3

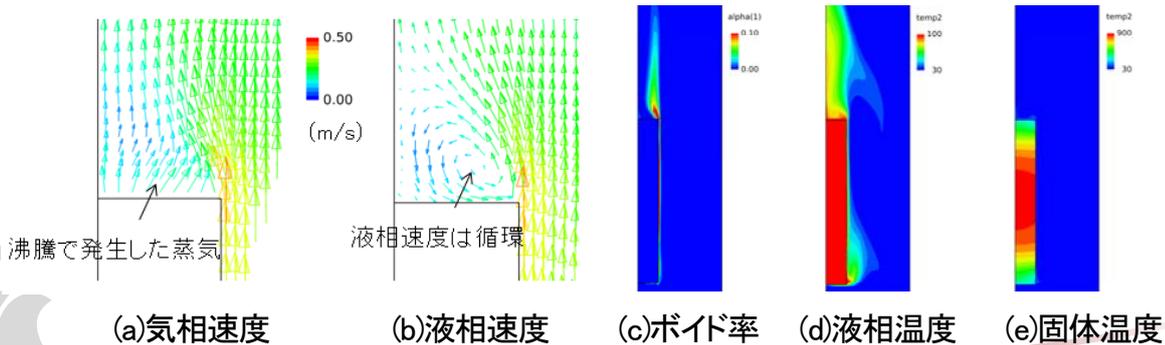
# Advance/FrontFlow/MPとは？

3. 気泡群解析モデルをより高精度で相変化にも対応できるように、LES乱流モデルの導入と沸騰凝縮モデルの高度化を図る(JST/A-STEP採択課題)。
4. さらなる高速化、ロバスト性の向上を図りつつ、スラグ流、チャーン流などの多種多様な流動パターンに適用できる高機能・高精度(機構論的)3次元モデル(構成方程式)の開発を行い、欧米の流体解析ソフトウェアを凌駕する世界トップレベルの気液二相流解析ソフトウェアを目指す。

4

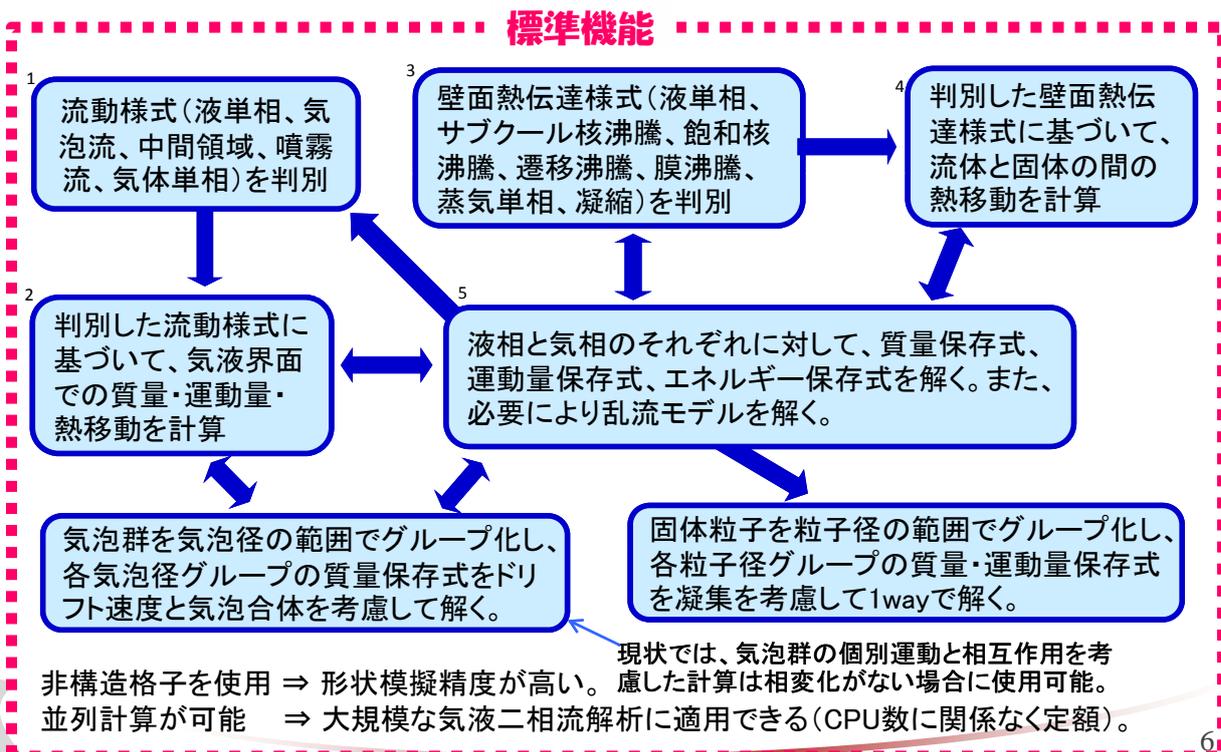
# Advance/FrontFlow/MPの特長

1. 沸騰と凝縮を安定に計算できる(ロバスト性が高い)。
2. 気泡流、噴霧流、自由表面、沸騰、凝縮、固体熱伝導を同時に扱える。
3. 壁面熱伝達(液単相、サブクール核沸騰、飽和核沸騰、遷移沸騰、膜沸騰、蒸気単相、凝縮)、界面熱伝達、界面抗力、揚力、乱流拡散力、仮想質量力、壁面潤滑力などの構成方程式が組み込まれている。
4. 気泡群の個別運動と相互作用(気泡合体)を扱える(高精度詳細気泡流解析モデル)。
5. 固体粒子の凝集を扱える。
6. 機能の追加など柔軟にカスタマイズができる。



Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved 焼入れ解析の例

# Advance/FrontFlow/MPの構成



Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

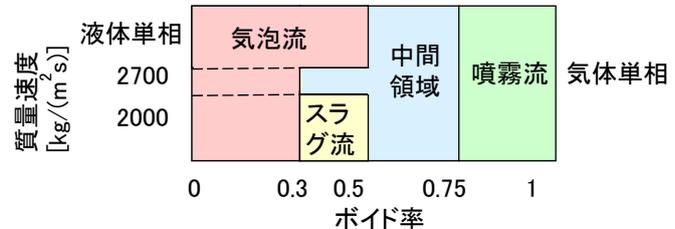
## (1) 流動様式

二流体モデルは一般的にメッシュ内での気液界面形状を捉えないので、メッシュ内の流動様式を各時刻・各メッシュで求めて、その流動様式に応じた構成方程式を使用する。

### ①ボイド率で分類するモデル(デフォルト)



### ②ボイド率と質量速度で分類するモデル



### ③混相を気泡流で計算するモデル



### ④混相を噴霧流で計算するモデル



Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

## (2) 乱流モデル

### ①混合型k-εモデル(デフォルト)

速度、密度、粘性係数を気相と液相で平均化したものを使う混合型モデルで、気泡流から噴霧流まで全ての流動様式をカバーする。单相領域では单相流の式になる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla(\rho_m k v_m) = \nabla \left\{ \left( \frac{\mu_{m,t}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right\} + G_m - \rho_m \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \nabla(\rho_m \varepsilon v_m) = \nabla \left\{ \left( \frac{\mu_{m,t}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right\} + c_1 \frac{\varepsilon}{k} G_m - c_2 \rho_m \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i$$

$$\mu_{m,t} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$\mathbf{v}_m = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i}$$

### ②分散型k-εモデル

気泡流で適用できるモデル・・・気泡が液相に生成する乱流を考慮できる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \alpha_i k) + \nabla(\rho_i \alpha_i k v_i) = \nabla \left\{ \alpha_i \left( \mu_i + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \nabla k \right\} + \alpha_i G - \rho_i \alpha_i \varepsilon + \alpha_i S_k$$

$$S_k = \frac{3}{8r_b} \alpha_g \rho_i C_D V_r^3$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \alpha_i \varepsilon) + \nabla(\rho_i \alpha_i \varepsilon v_i) = \nabla \left\{ \alpha_i \left( \mu_i + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right\} + c_1 \alpha_i \frac{\varepsilon}{k} G - c_2 \rho_i \alpha_i \frac{\varepsilon^2}{k} + c_3 \alpha_i S_k \frac{\varepsilon}{k}$$

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

## (3) 相間の運動量交換

### (3-1) 界面摩擦力

界面摩擦力は、液体と気体の間の抵抗力を表す。  
液体中に気泡が存在する場合には、以下の式で単位体積当たりの力を表現する。

$$F_{D,g} = \sum_{j=1}^N \frac{1}{8} a_j C_{Dj} \rho_l |V_g - V_l| (V_g - V_l)$$

#### 気泡の挙動

##### ① 気泡径が小さいか表面張力が大きい場合

- ・気泡は球形で直線的に運動する。
- ・高純度の液体では、気泡内部に循環が形成されて粘性抵抗が減少し、終端速度が大きくなる。

##### ② 気泡径が大きい場合表面張力が小さい場合

- ・気泡は非球形で振動的に運動する。
- ・液体の純度は影響しない。

# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

界面摩擦力を与えるための抗力係数は、前ページの①と②を考慮して、広範囲な気泡径と流体物性に対する実験データを神戸大・富山らがフィッティングした以下の式を使用する。

$$C_D = \begin{cases} \max \left[ \min \left\{ \frac{16}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{48}{Re} \right\}, \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \alpha_i^{3-2n} & \text{高純度の液体の場合} \\ \max \left[ \min \left\{ \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{72}{Re} \right\}, \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \alpha_i^{3-2n} & \text{中純度の液体の場合} \\ \max \left[ \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{8}{3} \frac{Eo}{Eo + 4} \right] \alpha_i^{3-2n} & \text{低純度の液体の場合} \end{cases}$$

ここで

- $Eo$  : エトベス数 (浮力と表面張力の比)
- $M$  : モルトン数 (流体の物性値の影響を示す)
- $Re$  : 気泡レイノルズ数 ( $Eo$ 、 $M$ 、 $C_D$  から計算)

$10^{-2} < Eo < 10^3$ 、 $10^{-14} < M < 10^7$ 、 $10^{-3} < Re < 10^5$  という広範囲な気泡径と流体物性において実測値と良好に一致し、気泡が群として運動する効果も考慮される。

液滴流では、剛体球の実験式を使用する。

中間領域では、気泡流と噴霧流の界面摩擦力が滑らかにつながるように3次式で補間。

# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

## (3-2) 揚力

揚力は、気液速度差と液体の速度勾配によって、主流に対して垂直方向に働く力を表す。

気泡は、揚力の作用で、気泡サイズにより壁に近づいたり壁から離れたりする。

$$F_{L,g} = \sum_{j=1}^N \alpha_g C_T \rho_l (V_g - V_l) \times (\nabla \times V_l)$$

揚力を与えるための揚力係数は、広範囲な気泡径と広範囲な流体物性に対する実験データを富山らがフィッティングした以下の式を使用する。

$$C_T = \begin{cases} \min[0.288 \tanh(0.121 Re_b), f(Eo_d)] & \text{for } Eo_d < 4 \\ f(Eo_d) & \text{for } 4 \leq Eo_d \leq 10.7 \end{cases}$$

$$f(Eo_d) = 0.00105 Eo_d^3 - 0.0159 Eo_d^2 - 0.0204 Eo_d + 0.474$$

ユーザーが揚力係数を与えることも可能。

A. Tomiyama et al. / Chemical Engineering Science 57 (2002) 1849–1858

11

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

## (3-3) 壁面潤滑力

壁面潤滑力は、気泡が壁に沿って移動するときに、壁と反対側に液体が排除されるのに伴って気泡が壁から遠ざかる挙動を表現する。

以下に示すAntalらのモデルを使用する。

$$F_{W,g} = \sum_{j=1}^N \left( C_{W1} + C_{W2} \frac{r_g}{y} \right) \alpha_g \rho_l \frac{u_r^2}{r_g} n_w$$

## (3-4) 乱流拡散力

乱流拡散力は、ボイド率分布に偏りがあるときに、ボイド率分布を均一化する力を表現する。例えば、気泡群が上昇するときに気泡群の乱流による広がりを表現する。

以下に示すLopezらのモデルを使用する。

$$F_{TD,g} = - \sum_{j=1}^N C_{TD} \rho_l k_l \nabla \alpha_g$$

12

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

## (4) 相間熱伝達

①気泡流に対する相間熱伝達係数  $h_{il}$ 、 $h_{ig}$  と界面積  $A_i$  の計算式

$$h_{il} = \begin{cases} \max(h_{il1}, h_{il2}) & (T_l \geq T_s) \\ 0.02\rho_l V_r \frac{\partial e_l}{\partial T_l} & (T_l < T_s) \end{cases} \quad \cdot\cdot \text{液体側の相間熱伝達係数}$$

$$h_{ig} = \begin{cases} 1000 & (T_g \geq T_s) \\ = 10000 & (T_g < T_s) \end{cases} \quad \cdot\cdot \text{蒸気側の相間熱伝達係数}$$

$$A_i = 6\alpha_g \frac{1}{D_b} \quad \cdot\cdot \text{界面積}$$

ここで

$$h_{il1} = \frac{\lambda_l}{D_b} (2 + 0.74 \text{Re}_b^{0.5})$$

$$h_{il2} = 3.81972(T_l - T_s) \frac{\lambda_l}{D_b} \frac{\rho_l \frac{\partial e_l}{\partial T_l}}{\rho_g (h_{sg} - h_{sl})}$$

# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

②噴霧流に対する相間熱伝達係数  $h_{il}$ 、 $h_{ig}$  と界面積  $A_i$  の計算式

$$h_{il} = \begin{cases} 15000 \frac{\lambda_l}{D_d} & (T_l \geq T_s) \\ 0.02\rho_l V_{circ} \frac{\partial e_l}{\partial T_l} & (T_l < T_s) \end{cases} \quad \cdot\cdot \text{液体側の熱伝達係数}$$

$$h_{ig} = \frac{\lambda_g}{D_d} (2 + 0.74 \text{Re}_g^{0.5} \text{Pr}_g^{0.333}) \quad \cdot\cdot \text{蒸気側の熱伝達係数}$$

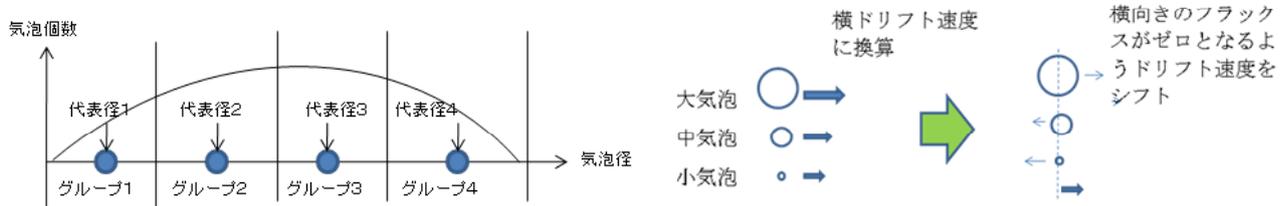
$$A_i = 6(1 - \alpha_g) \frac{1}{D_d} \quad \cdot\cdot \text{界面積}$$

## ③中間領域

気泡流と噴霧流の界面熱流束が滑らかにつながるように3次式で補間する。

## (5) 気泡群個別運動と相互作用(気泡合体)モデル (高精度詳細気泡流解析モデル)

### ①グループ化とドリフト速度の)計算



- ・気泡径によって、抗力、揚力、壁潤滑力、乱流拡散力が異なり、異なる運動をする。
- ↓
- ・全ての気泡の運動方程式を考慮して圧力Poisson方程式と運動方程式を解くには計算機の負荷が大きすぎる。
- ↓
- ・大小さまざまな気泡群をグループに分けて、各気泡グループ毎の運動を解く。
- ↓
- ・各気泡グループの運動は、力学的平衡状態を仮定して、気相全体の平均速度からの速度差を計算する。

15

## 計算量の比較(気泡グループ数30、メッシュ数100万)

### ①偏微分方程式の数

#### 従来の方法

微分方程式の種類	式の数(本)
圧力ポアソン方程式	1
液相の質量保存方程式	1
各気泡グループの質量保存方程式	30
液相の運動量保存方程式(x,y,z方向)	3
各気泡グループの運動量保存方程式(x,y,z方向)	90
液相のエネルギー方程式	1
気相のエネルギー方程式	1
合計	127

#### 本方法(Advance/FrontFlow/MPの方法)

微分方程式の種類	式の数(本)
圧力ポアソン方程式	1
液相の質量保存方程式	1
各気泡グループの質量保存方程式	30
液相の運動量保存方程式(x,y,z方向)	3
気相の運動量保存方程式(x,y,z方向)	3
液相のエネルギー方程式	1
気相のエネルギー方程式	1
合計	40

16



## ②連立1次方程式の行列の次数N

方法の種類	N
従来の方法	$1,000,000 \times 127 = 127,000,000$
本発明の方法	$1,000,000 \times 40 = 40,000,000$

## ③計算量のオーダー $N^2$ の場合 (CG法では $N^3$ )

方法の種類	計算量のオーダー $N^2$
従来の方法	$N^2 = (127,000,000)^2 = 1.61 \times 10^{16}$
本発明の方法	$N^2 = (40,000,000)^2 = 1.60 \times 10^{15}$

本方法 (Advance/FrontFlow/MPの方法) は、従来の方法と比べて、計算時間が10倍以上短縮される。

(参考)ここで紹介した高精度詳細気泡流解析モデルと同様のモデルを採用している海外のソフトウェアでは、気泡群をさらにグループ化して運動方程式をそのまま解いており、ここで紹介したモデルより計算時間が掛かるものと予想される。

# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

### 標準的二流体モデル

- ・ 気相の質量保存式
- ・ 液相の質量保存式
- ・ 気相の運動量保存式
- ・ 液相の運動量保存式
- ・ 気相のエネルギー保存式
- ・ 液相のエネルギー保存式



### 気泡径分布を考慮する高精度詳細気泡流解析モデル

- ・ 気泡群の質量保存式 (複数)
- ・ 液相の質量保存式
- ・ 気相の運動量保存式
- ・ 気泡群の運動方程式 (代数方程式、複数)
- ・ 液相の運動量保存式
- ・ 気相のエネルギー保存式
- ・ 液相のエネルギー保存式

# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

## ③気泡群の質量保存式(ポピュレーションバランス方程式)

気泡合体による気泡径分布の変化を求めるために、気泡径グループ毎の質量保存式を解く。グループ数に制限はなく、i番目の気泡径グループは以下の式で表現する。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \alpha_{gi}) + \nabla(\rho_g v_g \alpha_{gi}) = S_{gi}$$

ここで 
$$S_{gi} = \rho_g \frac{\pi}{6} d_i^3 (B_{ci} - D_{ci} + B_{bi} - D_{bi})$$

$$B_{ci} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i Q_{jk}$$

$$D_{ci} = n_i \sum_{j=1}^N Q_{ij}$$

$$B_{bi} = \sum_{j=i+1}^N G_j n_j$$

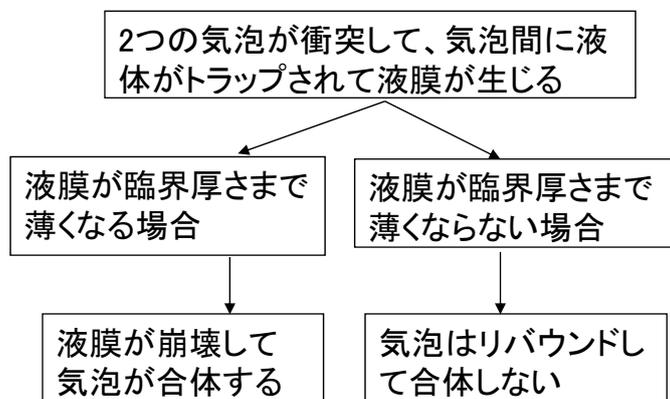
$$D_{bi} = n_i \sum_{j=1}^i G_j$$



# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

## ④気泡合体モデル

気泡がマイクロバブル化すると汚れや気泡の帯電が気泡合体に影響を与えるが、大きい気泡を扱うものとして、以下の力学モデルを使用する。



気泡合体の力学モデル



# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

## ⑤気泡合体のソースターム

Prince & Blanchモデルの場合

$Q_{ij} = (\theta_{ij}^T + \theta_{ij}^B + \theta_{ij}^L) \exp(-t_{ij} / \tau_{ij}) \cdots$  衝突頻度と、液膜が臨界厚さに達するまで2つの気泡が接触する割合(合体割合)の積で表現

- ここで
- $\theta_{ij}^T$  : 乱流運動による衝突頻度[1/(m<sup>3</sup>s)]
  - $\theta_{ij}^B$  : 浮力による衝突頻度[1/(m<sup>3</sup>s)]
  - $\theta_{ij}^L$  : 層流せん断による衝突頻度[1/(m<sup>3</sup>s)]
  - $\exp(-t_{ij} / \tau_{ij})$  : 液膜が臨界厚さに達するまで2つの気泡が接触する割合
  - $t_{ij} = C \left( \frac{r_{ij}^3 \rho_l}{16\sigma} \right)^{0.5} \ln \left( \frac{h_0}{h_f} \right)$  : 気泡間の合体に要する時間[s], Cはパラメータ
  - $\tau_{ij} = r_{ij}^{2/3} / \varepsilon^{1/3}$  : 気泡間の接触時間[s]
  - $\varepsilon$  : 乱流エネルギーの散逸率[m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>]

Luhモデル、Chestersモデル、Lehrモデルも選択可能。

# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

## (6) 固体粒子の凝集モデル(1way)

### ①粒径グループ毎の運動量保存式

$$\rho_p \frac{Dv_{pk}}{Dt} = -\frac{3}{4} C_{Dm} \frac{\rho_l}{d_{pm}} |v_l - v_{pk}| (v_{pk} - v_l) + \rho_l \frac{Dv_l}{Dt} + \frac{1}{2} \rho_l \left( \frac{Dv_l}{Dt} - \frac{Dv_{pk}}{Dt} \right) + (\rho_l - \rho_p) g_i$$

粒子の慣性力
相間の抗力
圧力勾配力
付加慣性力
浮力

### ②粒径グループ毎の個数濃度の保存方程式

$$\frac{\partial n_{pk}}{\partial t} + \nabla(n_{pk} v_{pk}) = \nabla(D_{pk} \nabla n_{pk}) + S_{pk}$$

凝集のソースタームとして速度差による凝集と乱流による凝集を考慮する。  
以下の  $S_{pk}$  はグループ kより小さい粒子同士が凝集してkが生成し、グループ kの粒子が他と凝集して kが消滅するソースタームを表す。

$$S_{pk} = \left( \frac{1}{2} \sum_{m+n=k} N_{mn} - \sum_{m=1}^{\max} N_{mk} \right) \eta = \left( \frac{1}{2} \sum_{m+n=k} \beta(m,n) n_m n_n - \sum_{m=1}^{\max} \beta(m,k) n_m n_k \right) \eta$$

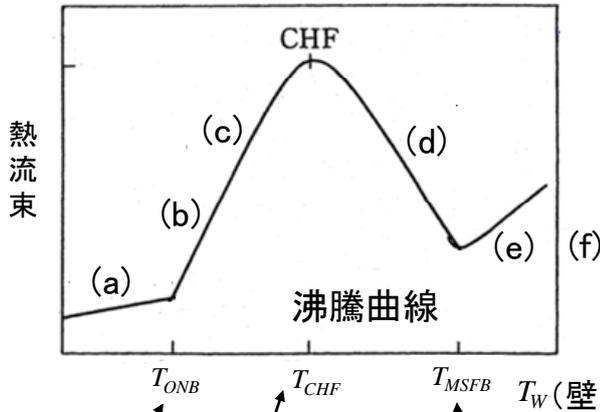
$$\beta(m,n) = 2(2\pi)^{0.5} R^2 \left\{ \left( 1 - \frac{\rho_l}{\rho_p} \right)^2 (\tau_m - \tau_n)^2 \frac{Dv_l}{Dt} + \frac{1}{3} \left( 1 - \frac{\rho_l}{\rho_p} \right)^2 (\tau_m - \tau_n)^2 g^2 + \frac{1}{9} R^2 \frac{\varepsilon \rho_l}{\mu_l} \right\}^{0.5}$$

$$R = \frac{d_{pm} + d_{pn}}{2} \quad \tau_m = \frac{4}{3} d_{pm}^2 \rho_l / (\mu_l \text{Re}_m C_{Dm})$$

# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

## (7) 壁面熱伝達

現バージョンは「TRAC-PF1コード」と「秋山,有富ら,新しい気液二相流数値解析-多次元流動解析,コロナ社,2002.」に記載されている式を使用。



壁面熱伝達様式として(a)から(g)を考慮。

- (a) 液単相
- (b) サブクール核沸騰
- (c) 飽和核沸騰
- (d) 遷移沸騰
- (e) 膜沸騰
- (f) 蒸気単相
- (g) 凝縮

沸騰開始温度

限界熱流束温度

最小安全膜沸騰温度

壁面温度とバルク(温度境界層外縁)の温度や速度から、各時刻・各メッシュで、(a)から(g)を判別して、各領域の熱流束式を使用する。

- $T_w \leq T_{CHF}$  : 核沸騰
- $T_{CHF} < T_w \leq T_{MSFB}$  : 遷移沸騰
- $T_{MSFB} \leq T_w$  : 膜沸騰

# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

## ①限界熱流束温度(核沸騰領域と遷移沸騰領域の境界)

以下の(a)と(b)の熱流束相関式が一致するように限界熱流束温度  $T_{CHF}$  を求める。

(a)Chenによる核沸騰熱流束相関式

$$q_{CHEN} = h_{nucb} (T_w - T_l)$$

(b)Zuberによる限界熱流束相関式

$$q_{CHF} = 0.15 h_{fg} \rho_g^{0.5} \{ \sigma g (\rho_l - \rho_g) \}^{0.25}$$

ここで

$$h_{nucb} = 0.00122 \frac{\lambda_l^{0.79} C_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} (h_{sg} - h_{sl})^{0.24} \rho_g^{0.24}} (T_w - T_s)^{0.24} (p_w - p)^{0.75} S W_{n2}$$

$$S = \begin{cases} 1.0 & (\text{Re}_{TPP} \leq 0) \\ (1 + 0.12 \text{Re}_{TPP}^{1.14})^{-1} & (0 < \text{Re}_{TPP} \leq 32.5) \\ (1 + 0.42 \text{Re}_{TPP}^{0.78})^{-1} & (32.5 < \text{Re}_{TPP} \leq 70) \\ (1 + 0.42 \times 70^{0.78})^{-1} & (70 < \text{Re}_{TPP}) \end{cases}$$

ユーザーが  $T_{CHF}$  を定数や任意の式で与えることも可能。

# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

## ②最小安全膜沸騰温度(遷移沸騰領域と膜沸騰領域の境界)

気体や懸濁物を含まない液中で沸騰気泡を生成する温度(均一沸騰核生成温度) $T_{HN}$ を使用して、最小安全膜沸騰温度 $T_{MSFB}$ を求める。

$$T_{MSFB} = T_{HN} + (T_{HN} - T_l) \left( \frac{\lambda_l \rho_l C_{pl}}{\lambda_w \rho_w C_{pw}} \right)^{0.5} \quad \text{ここで } T_{HN} = 705.44 - (4.722 \times 10^{-2})DP + (2.3907 \times 10^{-5})DP^2 - (5.8193 \times 10^{-9})DP^3$$

$$DP = 3203.6 - P$$

$T_{MSFB}$  は流体の種類、表面性状、形状、材質に影響され、上式の汎用性は高くないので、ユーザーが任意の式で与えることも可能。

## ③飽和核沸騰領域に対する壁面熱伝達係数 $h_{wl}$

強制対流熱伝達係数  $h_1$  と核沸騰熱伝達係数  $h_{nucb}$  からなるChenの式で求める。

$$h_{wl} = h_1 + W_{n1} h_{nucb} \quad \text{ここで } h_1 : \text{単相流で使用される強制対流熱伝達係数}$$

$$W_{n1} = \min \left( 1, \frac{T_w - T_s}{T_w - T_l} \right)$$

25

# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

## ④膜沸騰領域に対する壁面熱伝達係数

壁面と液相の間の輻射熱伝達係数と壁面と蒸気膜の間の対流熱伝達係数から  $h_{wl}$  を求める。

$$h_{wl} = h_r \frac{T_w - T_s}{T_w - T_l} + h_f \frac{T_w - T_s}{T_w - T_l}$$

ここで

$$h_r = (1 - \alpha_g) \sigma_{SB} \varepsilon_r \frac{T_w^4 - T_s^4}{T_w - T_s}$$

$$h_f = \begin{cases} h_{f0} & (\alpha_g \leq 0.5) \\ h_{f0} (3 - 2X_1) X_1^2 & (0.5 < \alpha_g \leq 0.75) \\ 0 & (0.75 \leq \alpha_g) \end{cases}$$

$$h_{f0} = 0.62 \left\{ \frac{\rho_g \lambda_g^3 (\rho_l - \rho_g) g h'_{lg}}{\mu_g (T_w - T_s) \lambda} \right\}^{0.25} \quad (\text{Bromleyの式})$$



# Advance/FrontFlow/MPの解析機能

## ⑤凝縮熱伝達

(1)から(3)の中で最も大きい値を使用する。

### (1)垂直あるいは傾斜面の膜状凝縮<sup>[1]</sup>

$$\frac{Gr \cdot Pr}{H} < 1.21 \times 10^{-3} S^4 \left(\frac{H}{Pr}\right)^{-4} \text{ の場合(層流の場合)}$$

$$Nu = 0.943 \left(\frac{Gr \cdot Pr}{H}\right)^{1/4}$$

$$1.21 \times 10^{-3} S^4 \left(\frac{H}{Pr}\right)^{-4} < \frac{Gr \cdot Pr}{H} < 1.24 \times 10^{-4} S^5 \left(\frac{H}{Pr}\right)^{-4} \text{ の場合(正弦波流の場合)}$$

$$Nu = 1.65 S^{-1/3} \left(\frac{H}{Pr}\right) \left(\frac{Gr \cdot Pr}{H}\right)^{1/3}$$

$$\frac{Gr \cdot Pr}{H} > 1.24 \times 10^{-4} S^5 \left(\frac{H}{Pr}\right)^{-4} \text{ の場合(高調波流か乱流の場合)}$$

$$Nu = 0.908 \left(\frac{H}{Pr}\right)^{1/15} \left(\frac{Gr \cdot Pr}{H}\right)^{4/15} \left[ 1 + 3.12 \times 10^{-11} \left\{ H^2 Pr^{-5/4} \left(\frac{Gr \cdot Pr}{H}\right)^{1/2} \right\}^2 \right]^{2/15}$$

### (2)強制対流の式

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \frac{\lambda_L}{l}$$

### (3)自然対流の式

$$Nu = \frac{4 \lambda_L}{l}$$

ここで

$l$  : 凝縮面長さ

$\lambda_L$  : 液体の熱伝導率

$$Gr = \frac{\varepsilon l^3 \rho_L - \rho_g}{\nu_L^2 \rho_L} : \text{グラスホフ数}$$

$\varepsilon$  : 重力加速度 (傾斜面の場合は面の傾きを補正)

$\nu_L$  : 液体の動粘性係数

$\rho_L$  : 液体の密度

$\rho_g$  : 気体の密度

$Pr$  : 液体のプラントル数

$$H = \frac{C_{FL} (T_x - T_w)}{L} : \text{顕潜熱比}$$

$C_{FL}$  : 液体の定圧比熱

$T_x$  : 表面から10mm離れた位置の温度

$T_w$  : 表面温度

$L$  : 凝縮の潜熱

$$S = \left( \frac{3 \sigma^3}{\rho_L^2 \varepsilon \nu_L^4} \right)^{1/6}$$

$\sigma$  : 表面張力

参考文献: [1] 上原春男, 木下英二, 機論, 63, 616, B(1997), 4013-4020.

# Advance/FrontFlow/MPの解析実績

## ➤ 自動車

- 油焼入れ解析(熱伝達率の解析)
- 水焼入れ解析(熱伝達率の解析)
- 油圧機器の油・空気混相流からの気泡除去解析
- 密閉熱交換器の沸騰凝縮解析
- 配管内気液二相流の圧損解析
- タンク内のスロッシング解析

## ➤ 化学

- 気泡塔内の気液二相流解析
- 配管の沸騰・凝縮による熱疲労解析

## ➤ 原子力

- BWR燃料集合体試験詳細解析
- 新型炉燃料集合体詳細解析
- 新型炉気水分離器詳細解析
- 気流ジェット噴流装置の解析
- 垂直管の環状流解析
- 水平管の環状流解析
- 地震時プール水のスロッシング解析

## ➤ その他

- 製鉄プロセスの解析
- 熱交換器の沸騰凝縮解析
- 配管内の液滴蒸発解析 (水、水蒸気、空気の3相分布解析)
- 配管内の過熱蒸気の凝縮解析

# 解析事例1 沸騰解析

## (目的) 円管内の沸騰解析

### ■ 解析条件

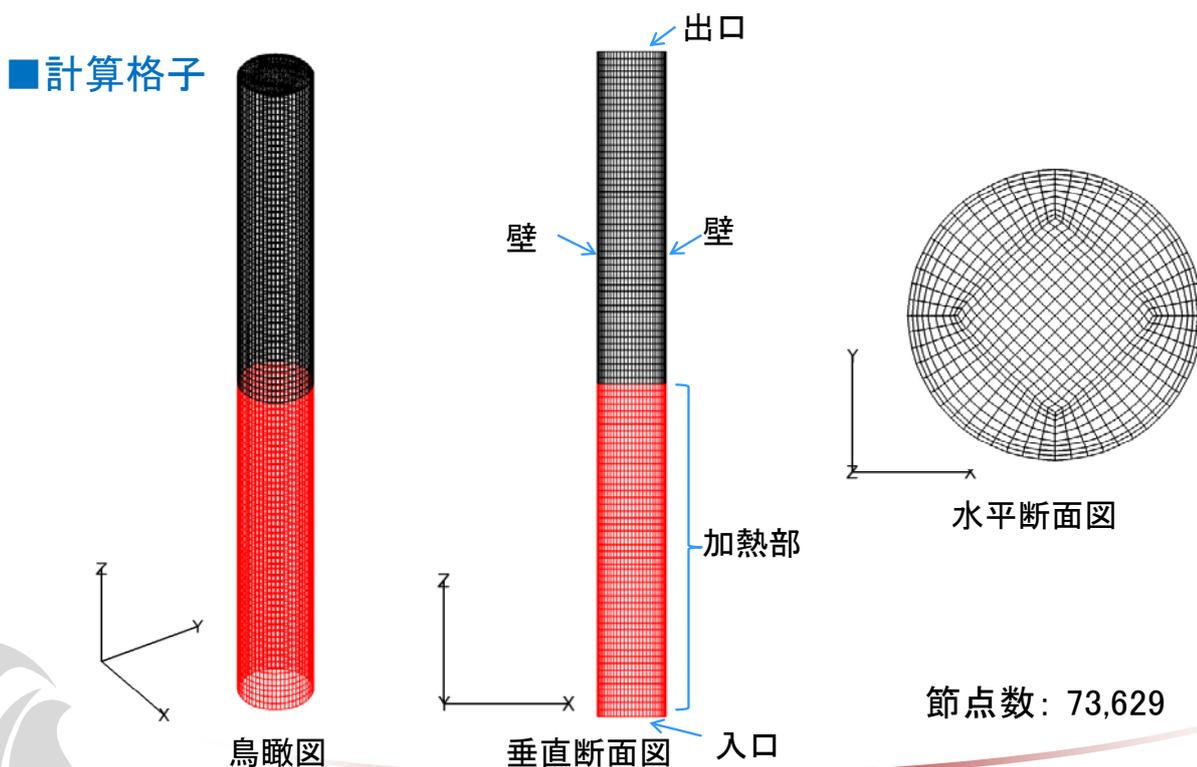
- ・管の形状: 円管、内径0.1m、長さ1m
- ・管の向き: 垂直
- ・流体の種類: 水
- ・加熱部: 管中央から入口までの壁
- ・熱流束:  $10^5 \text{W/m}^2$
- ・入口サブクール度: 5度
- ・入口平均速度: 0.1m/s(上向き)
- ・出口圧力: 1気圧
- ・時間刻み: 0.001秒一定
- ・基礎方程式: 二流体モデル
- ・流動様式: 液体单相、気泡流、中間領域、噴霧流、気体单相を考慮
- ・界面摩擦力: 気泡流では富山らの式、噴霧流では剛体球の式、その間は3次式で補間
- ・気泡径: 3mm
- ・液滴径:  $1 \mu\text{m}$

### ■ 計算時間

- ・OS : CentOS
- ・CPU: Intel(R) Xeon(R)、2.80GHz
- ・コンパイラ: Intel
- ・時間刻み: 0.001sec
- ・並列数: 6
- ・現象30秒の計算時間: 16時間37分

# 解析事例1 沸騰解析

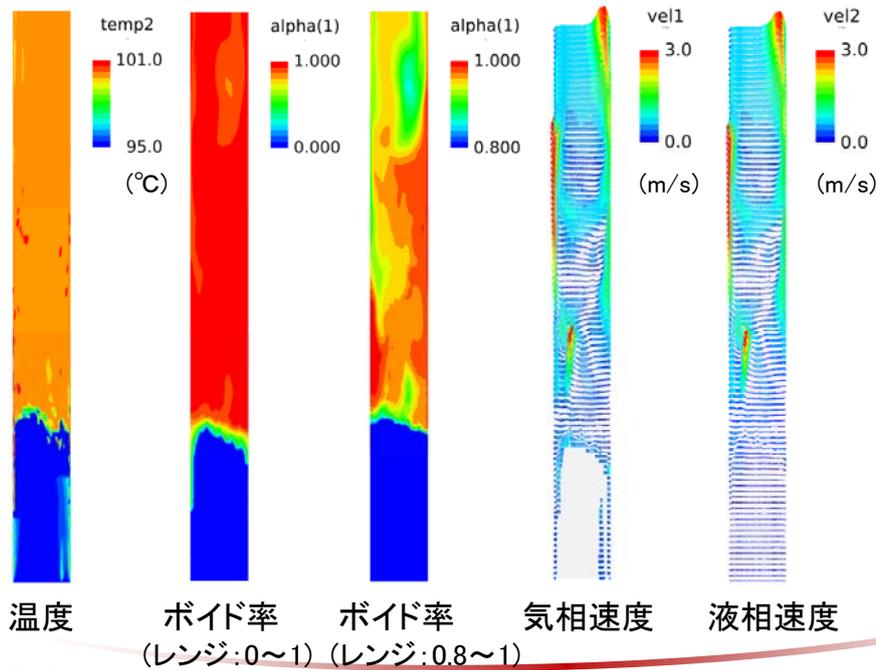
### ■ 計算格子



# 解析事例1 沸騰解析

## ■ 解析結果(30秒後の瞬時値)

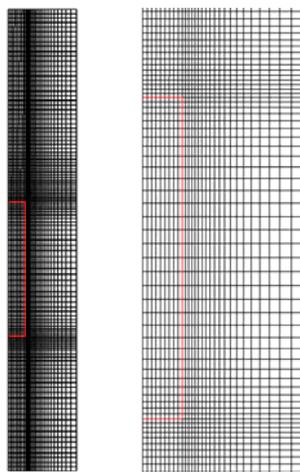
気相速度はボイド率が $1E-5$ 以上の場所で表示



# 解析事例2 沸騰凝縮と固体内熱伝導解析

(目的) 沸騰凝縮を伴う気液二相流と固体内熱伝導の連成解析

## ■ 計算格子



全体図

拡大図

計算格子

2次元軸対称モデルを使用して、600°Cの銀の円柱を100°Cの水槽に置いた状態を初期値として30秒間の非定常計算を行い、文献[1]の実験値と比較する。

## ■ 解析条件

- ・時間刻み: 0.005秒一定
- ・現象時間: 30秒
- ・節点数: 10,503
- ・基礎方程式: 二流体モデルと固体の熱伝導方程式
- ・流動様式: ボイド率から液体単相、気泡流、中間領域、噴霧流、気体単相を考慮
- ・気泡流の界面摩擦係数: 富山らの式
- ・噴霧流の界面摩擦係数: 剛体球の式
- ・中間領域の界面摩擦係数: 気泡流と噴霧流の界面摩擦係数を3次式で補間
- ・壁面熱伝達: 液単相、サブクール核沸騰、飽和核沸騰、遷移沸騰、膜沸騰、気体単相を考慮
- ・最小安全膜沸騰温度: 実験値を使用
- ・円柱の長さ: 32mm
- ・円柱の直径: 8mm

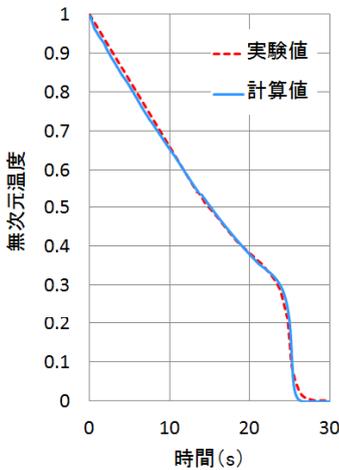
## 参考文献

- [1] 山田, タカシ; 茂地, 徹; 桃木, 悟; 金丸, 邦彦, 有限長の垂直円柱まわりの過渡膜沸騰熱伝達に関する研究(第1報): 実験, 長崎大学工学部研究報告 Vol.28(51) p.139-142, 1998.

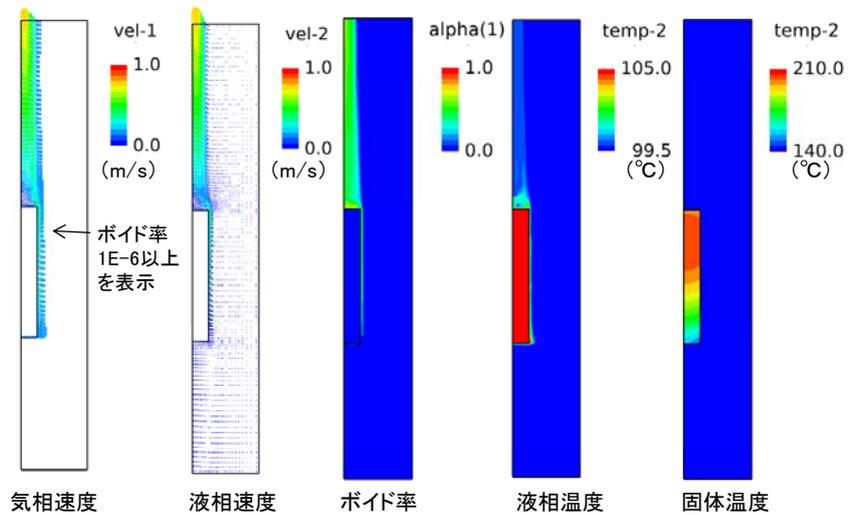
## 解析事例2 沸騰凝縮と固体内熱伝導解析

### ■ 解析結果

円柱中央位置の冷却曲線



25秒後(遷移沸騰時)の計算結果



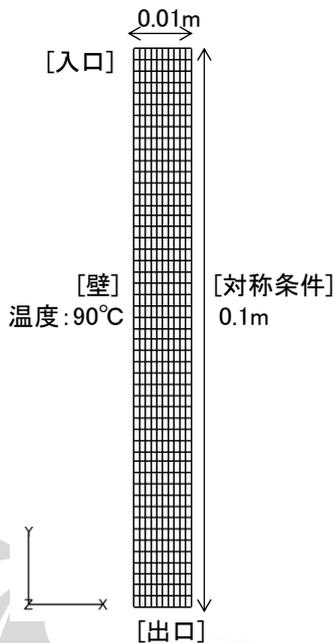
$$\text{無次元温度} = \frac{\text{円柱中央位置の温度} - 100}{600 - 100}$$

計算時間 OS : CentOS  
CPU: Intel(R) Xeon(R), 2.80GHz  
コンパイラ: Intel  
時間刻み: 0.005sec一定  
並列数: 1  
現象30秒までの計算時間: 2時間28分

## 解析事例3 凝縮解析

### ■ 計算格子

ボイド率: 0.9999999  
温度: 100.1°C  
速度: 0.1m/sと1m/s



### (目的) 垂直平板における凝縮解析

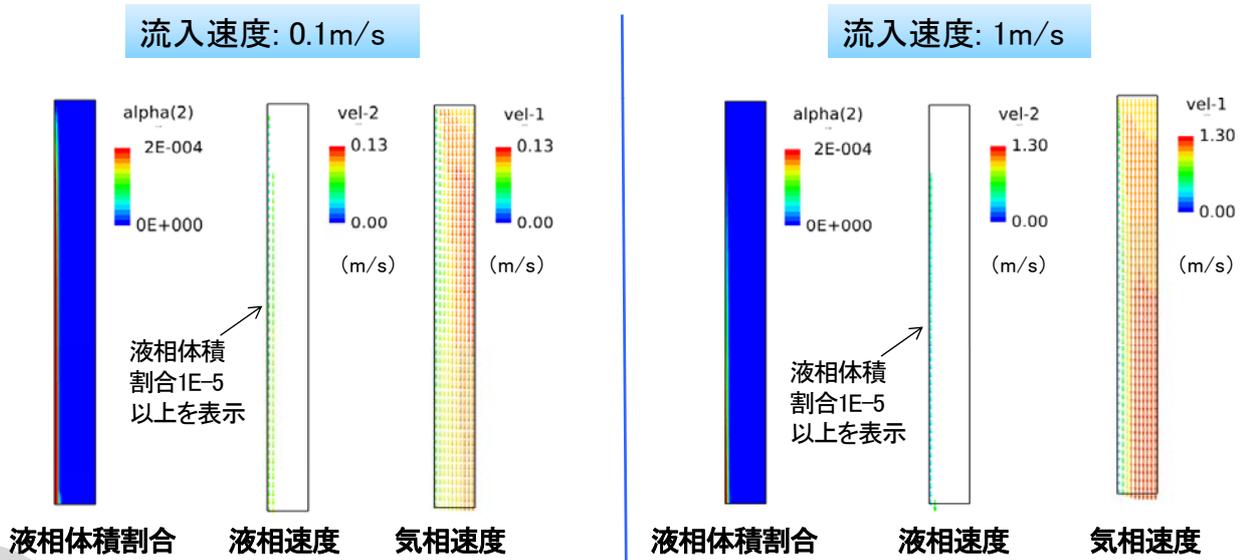
#### ■ 解析条件

- ・時間刻み: 1秒一定
- ・メッシュ形状: ヘキサ
- ・節点数: 1,683
- ・流動様式: ボイド率から液体単相、気泡流、中間領域、噴霧流、気体単相を考慮
- ・噴霧流の界面摩擦力: 剛体球の式
- ・壁面熱伝達: 凝縮熱伝達係数<sup>[1]</sup>
- ・飽和温度: 100°C
- ・流体の物性値: 1気圧、100°Cの物性値
- ・流体の初期温度: 100.1°C
- ・境界条件: 左の図を参照

[1] 上原春男, 木下英二, "鉛直面上の体積力対 流の波流および乱流膜状凝縮平均熱伝達係数の整理式", 機論, 63-616B(1997)4013-4020.

# 解析事例3 凝縮解析

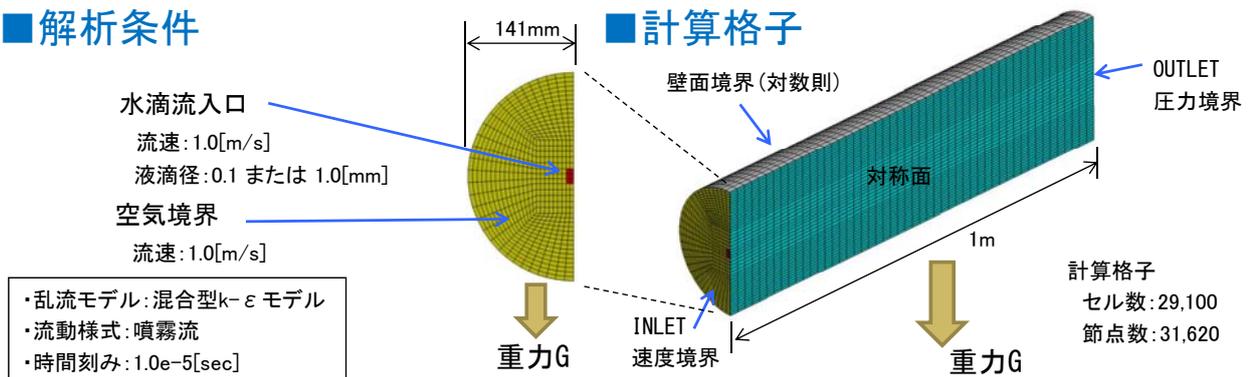
## ■ 解析結果



# 解析事例4 蒸発解析

(目的) 空気中での水滴の蒸発解析

## ■ 解析条件



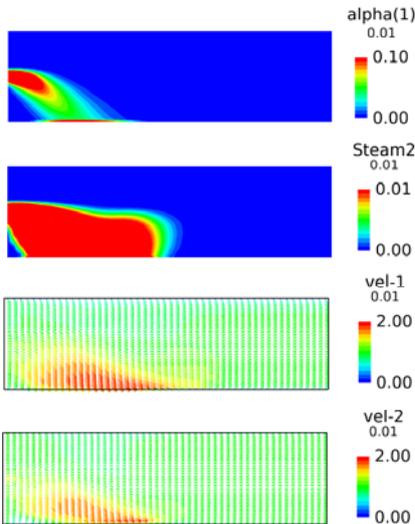
- ・乱流モデル: 混合型k-εモデル
- ・流動様式: 噴霧流
- ・時間刻み: 1.0e-5[sec]

	Ys(1)	Ys(2)
第1相	液滴(水滴) 密度: 1000 [kg/m <sup>3</sup> ] 粘性係数: 1E-3	
	Ys2(1)	Ys2(2)
第2相	非凝縮ガス(空気) 密度: 1 [kg/m <sup>3</sup> ] 粘性係数: 2E-5 [Pa·s] 分子量: 0.02897[kg/mol]	蒸気(水蒸気) 密度: 0.03 [kg/m <sup>3</sup> ] 粘性係数: 1E-5 [Pa·s] 分子量: 0.018[kg/mol] 密度 × 拡散係数: 3E-5[kg/m <sup>3</sup> ·m <sup>2</sup> /s]

# 解析事例4 蒸発解析

## ■ 解析結果(0.2秒後)

液滴径 : 0.1 mm



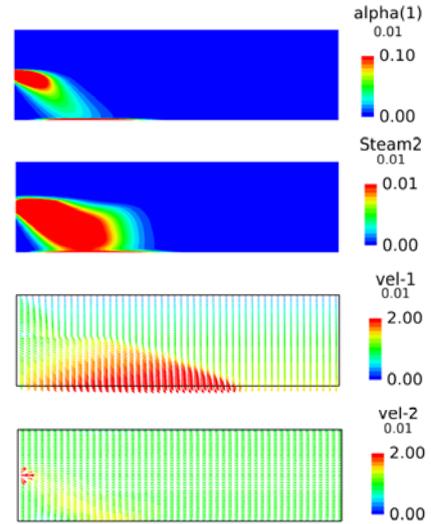
第1相(液滴)の  
体積率

第2相における  
水蒸気の質量分率

第1相(液滴)の  
速度ベクトル分布[m/s]

第2相(気体)の  
速度ベクトル分布[m/s]

液滴径 : 1 mm

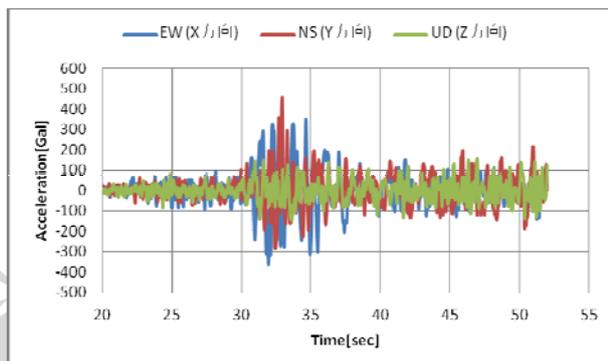


# 解析事例5 自由表面解析

(目的) タンクのスロッシング解析

## ■ 解析条件

- ・タンク形状: 円筒タンク、内径4m × 高さ4m(円錐板頂点: 4.3m)
- ・初期液面高さ: 3m
- ・天板: 平板
- ・液相: 軽油(52°C) 気相: 空気(20°C)
- ・入力波: 1968年十勝沖地震の八戸港湾での強震記録(\*)を2倍にした波をX,Y,Z方向に同時入力 (解析では実測データの20[s]を0[s]とした。)

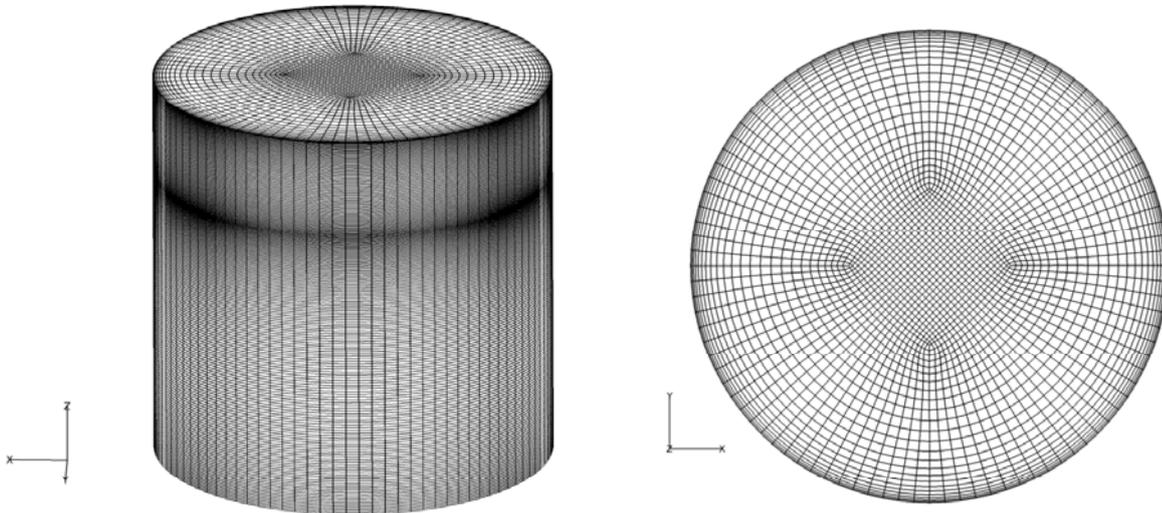


\* 翠川三郎, 三浦弘之: 1968年十勝沖地震の八戸港湾での強震記録の再数値化, 日本地震工学会論文集, 第10巻, 第2号, pp.12-21, 2010  
[http://www.enveng.titech.ac.jp/midorikawa/open\\_data.html](http://www.enveng.titech.ac.jp/midorikawa/open_data.html)

# 解析事例5 自由表面解析

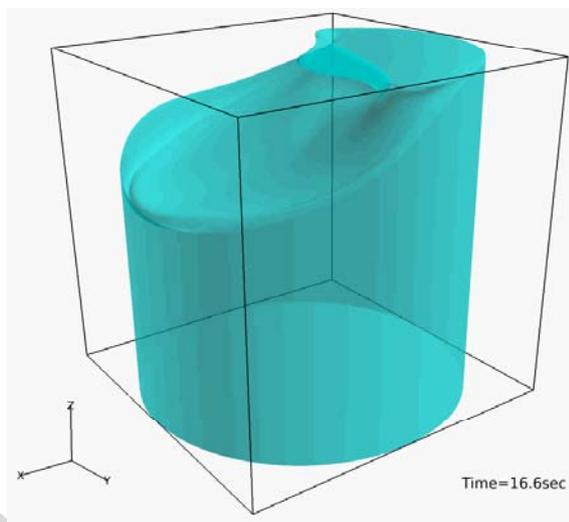
## ■ 計算格子

周方向: 96分割  
高さ方向: 200分割  
節点数: 588,729

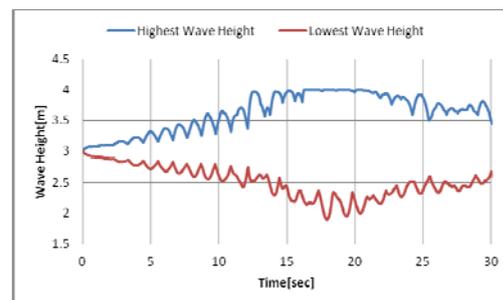


# 解析事例5 自由表面解析

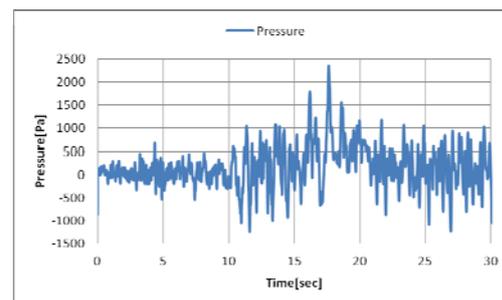
## ■ 解析結果



流体領域の分布 (16.6秒後)



最大波高と最小波高の時間変化



天板における最大圧力の時間変化

## 解析事例6 気泡合体解析

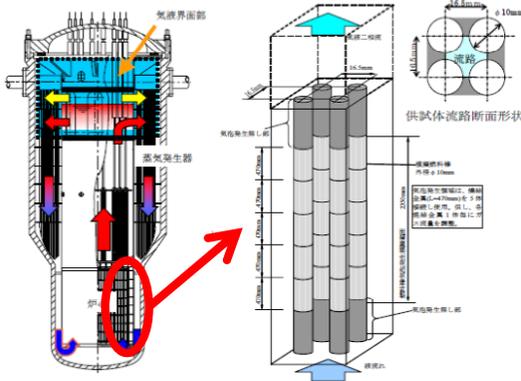
(目的) 新型炉(自然循環炉)燃料集合体試験のサブチャンネル解析

### ■ 解析条件

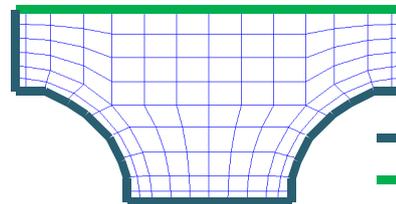
- ・通常運転を想定した代替流体の気液二相流 (気相: 六フッ化硫黄、液相: エタノール)
- ・高レイノルズ数型のk-εモデルを適用
- ・壁面には壁関数を適用
- ・最下段のみから気泡を注入した試験
- ・気泡は、0.1mmから5mmまでを5群で考慮

### ■ 計算格子

- ・断面内のメッシュサイズは1mm程度
- ・軸方向のメッシュサイズは3mm程度
- ・解析格子数 81,150 (1/2モデル)



出典:  
革新的実用原子力技術開発費補助事業  
平成18年度成果報告書概要版  
「高温高圧二相自然循環炉の熱流動システム評価手法の開発」



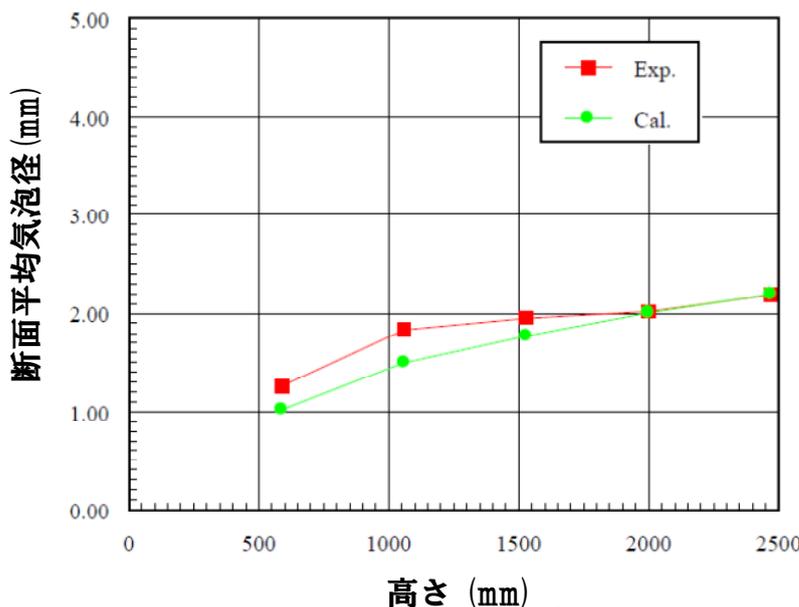
壁面  
対称面

41

## 解析事例6 気泡合体解析

### ■ 解析結果

断面平均気泡径の高さ方向分布: 実験値と計算値の比較



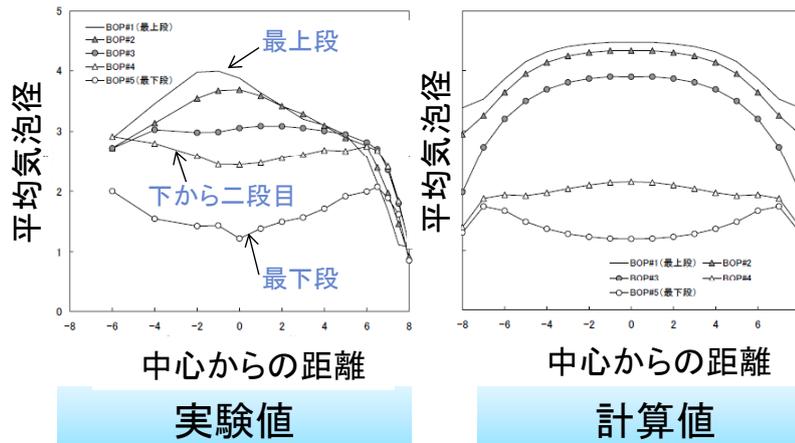
計算値はサブチャンネル内の上昇に伴って気泡径が増大する実験値を再現できている。

出典:  
革新的実用原子力技術開発費補助事業  
平成18年度成果報告書概要版  
「高温高圧二相自然循環炉の熱流動システム評価手法の開発」

42

## 解析事例6 気泡合体解析

### ■ 解析結果



計算値は、下段では気泡径が2mm以下の比較的小サイズであるため壁近傍に集まる「鞍型分布」を形成し、下流側に発達するにつれて合体によって気泡が大型化してサブチャンネル中心に集まる「砲弾型分布」を形成する実験値を再現できている。

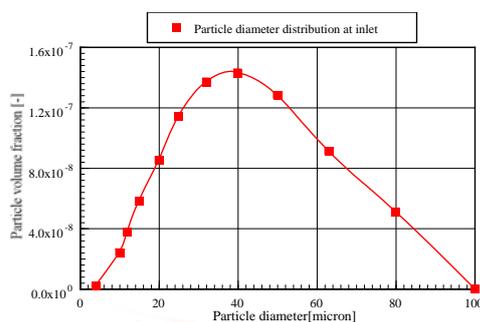
出典：  
革新的実用原子力技術開発費補助事業  
平成18年度成果報告書概要版  
「高温高圧二相自然循環炉の熱流動システム評価手法の開発」

## 解析事例7 固体凝集解析

(目的) 流動場での固体凝集解析

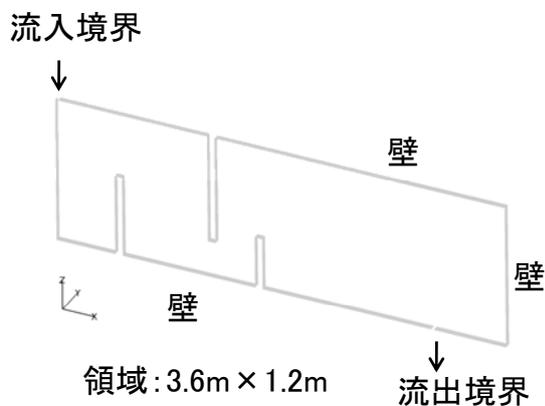
### ■ 解析条件

- ・液体の密度: 7100kg/m<sup>3</sup>
- ・固体の密度: 10000kg/m<sup>3</sup>
- ・流入速度: 0.4m/s
- ・固体の粒径: 次の12グループ  
4、10、12、15、20、25、32、  
40、50、63、80、100 μm
- ・入口の粒径分布:



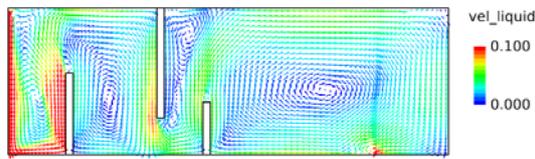
図中のプロットは考慮する粒径を表す。

### ■ 解析形状



# 解析事例7 固体凝集解析

## ■解析結果



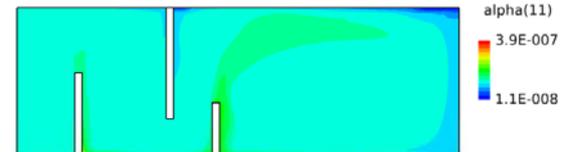
液体の速度分布 (単位:m/s)



粒径25 μ mの体積割合

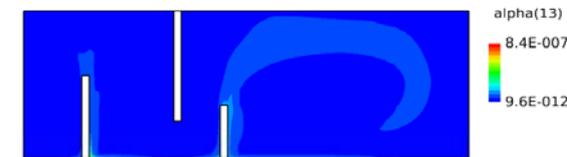


粒径50 μ mの生成・消滅速度(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>s)



粒径50 μ mの体積割合

正の値は、4~40 μ mの粒径の凝集によって、50 μ mの粒径が生成される速度を表す。  
負の値は、50 μ mの粒径が他の粒径と凝集して、50 μ mの粒径が消滅する速度を表す。



粒径80 μ mの体積割合

## 今後の開発計画

1. 気泡群解析モデルをより高精度で相変化にも対応できるように、LES乱流モデルの導入と沸騰凝縮モデルの高度化を図る(JST/A-STEP採択課題)。
2. 大規模解析への対応(前処理の高速化と省メモリ化、高速化を行い、今年度8月頃に京スーパーコンピュータに載せる)
3. さらなる高速化、ロバスト性の向上を図りつつ、スラグ流、チャーン流などの多種多様な流動パターンに適用できる高機能・高精度(機構論的)3次元モデル(構成方程式)の開発を行う。
4. A-STEP実用化挑戦ステージの提案
  - ①計算速度を100倍短縮する。
  - ②ロバスト性(計算安定性)が高く、必ず計算結果が出る。
  - ③ユーザー企業が機器の設計や研究開発で活用できるまでの計算精度が保障される。
  - ④流体解析の知識がないユーザーでも簡単に計算の実行と計算結果の可視化を行うことができる。
  - ⑤物性値(温度や圧力の依存性)や構成方程式や数値パラメーターが自動で適切に設定される。

# 謝辞

ご清聴ありがとうございました。

科学技術振興機構様には、平成25年度A-STEPシーズ顕在化タイプ「相変化を伴う3次元気液二相流解析プログラムの研究開発」の申請を採択していただきまして、誠にありがとうございました。

ご来場の皆様ならびに科学技術振興機構様には、今後ともご支援の程何卒よろしくお願い申し上げます。

# 「相変化を伴う3次元気液二相流解析プログラムの研究開発」 ～科学技術振興機構A-STEP採択課題の成果～

技術第4部 杉中 隆史

2014年6月10日（火）  
アドバンスソフト株式会社

1

## 内容

1. A-STEP(研究成果最適展開支援プログラム)
2. A-STEPシーズ顕在化タイプの開発の背景
  - 2.1 開発するソフトウェアの利用分野
  - 2.2 開発するソフトウェアの波及効果
  - 2.3 解析対象とする気液二相流挙動の例
  - 2.4 市販ソフトの問題点
3. A-STEPシーズ顕在化タイプにおける開発目的
4. A-STEPシーズ顕在化タイプにおける開発内容
  - 4.1 乱流挙動の予測精度の向上
  - 4.2 気泡径分布の変化の取り扱い
  - 4.3 気泡合体のソースタームの取り扱い
  - 4.4 3次元構成方程式、計算時間の短縮化、計算安定性の調査
5. A-STEP実用化挑戦ステージの提案
  - 5.1 目標
  - 5.2 開発するソフトウェアの内容

2

# 1. A-STEP(研究成果最適展開支援プログラム)

科学技術振興機構(略称JST)は、イノベーションの創造を推進します。知の創出から研究成果の社会還元とその基盤整備を担うわが国の中核的機関です。

A-STEPは、JSTによる研究成果最適展開支援プログラムで、社会経済や科学技術の発展、国民生活の向上に寄与するため、大学や公的研究機関等の優れた研究成果の実用化を通じた、イノベーションの効率的・効果的創出を目的とした技術移転事業です。(引用元: <http://www.jst.go.jp/a-step/>)



引用元: <http://www.jst.go.jp/a-step/outline/index.html>

## 2. A-STEPシーズ顕在化タイプの開発の背景

### 2.1 A-STEPシーズ顕在化タイプ(平成25年度の採択課題)

- ・「相変化を伴う3次元気液二相流解析プログラムの研究開発」
- ・実施期間 平成25年9月～平成26年8月(実施中)

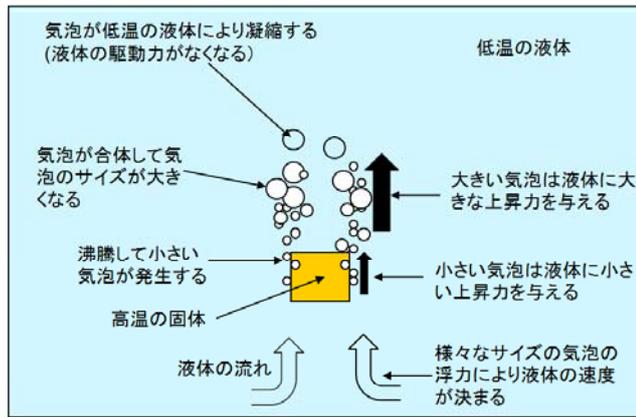
### 2.2 開発するソフトウェアの利用分野

- ・発電システム、熱交換器、熱処理(焼入れ)、冷熱機器、環境技術、燃料電池、輸送機器、化学装置、水資源管理など気液二相流を伴う幅広い分野で利用できる。

### 2.3 開発するソフトウェアの波及効果

- ・機器の研究開発や設計の高度化
- ・機器の高品質化
- ・開発期間の短縮
- ・コストダウン
- ・国際競争力の強化
- ・エネルギー利用の高効率化
- ・CO<sub>2</sub>の削減に貢献

## 2.4 解析対象とする気液二相流挙動の例



### 相変化を伴う気液二相流の例 (焼入れ過程)

- 液体の過熱が進むと、気泡核をもとに蒸気泡の成長が始まる。
- 気泡の成長に伴って浮力が増大し、これが表面張力による付着力を越えたときに、小さい気泡が過熱面から離脱する。離脱する気泡径は条件により異なる。
- 膜沸騰→遷移沸騰→核沸騰 と沸騰形態が替わる温度(最小安全膜沸騰温度と限界熱流束温度)や各沸騰域での壁面熱伝達率は条件により異なる。
- 液体の種類により、膜沸騰は物体のエッジで蒸気膜が振動しながら崩壊する。
- 気泡は合体して大きくなると、浮力が大きくなり、液体を大きく駆動させる。
- 気泡の浮力によって押し上げられる液体は、鉛直方向の乱流強度が卓越する。
- 気泡が存在しない液体単相領域の乱流挙動の予測精度を上げる。

5

## 2.5 市販ソフトの問題点

市販ソフトが産業界で活用できていないのは、以下の①から⑤の課題が解決されていないためと考えられる。

- ①乱流挙動の予測精度が低い。
- ②気泡径分布の変化が適切に取り扱えない。
- ③相変化を伴う場合に適切な3次元の構成方程式が実装されていない。
- ④計算時間が莫大である。
- ⑤計算が破綻しやすい。

6

### 3. A-STEPシーズ顕在化タイプにおける開発目的

・気泡流を対象として

- ①乱流挙動の予測精度が低い。
- ②気泡径分布の変化が適切に取り扱えない。

という課題をAdvance/FrontFlow/MPを使用して改善する。

・伝熱面から生成される気泡の大きさに着目した実験を重点的に実施する。

・次の③から⑤の課題を解決する方法を調査・検討する。

- ③相変化を伴う場合に適切な3次元の構成方程式が実装されていない。
- ④計算時間が莫大である。
- ⑤計算が破綻しやすい。

### 4. A-STEPシーズ顕在化タイプにおける開発内容

#### 4.1 乱流挙動の予測精度の向上

乱流の予測精度を上げるために考慮すべき現象

- 気泡は合体して大きくなると、浮力が大きくなり、液体を大きく駆動させる。
- 気泡の浮力によって押し上げられる液体は、鉛直方向の乱流強度が卓越する。
- 気泡が存在しない液体単相領域の乱流挙動。



Advance/FrontFlow/MPに、ラージ・エディ・シミュレーション  
(ダイナミックSGSと標準Smagorinsky)を実装して、  
ラージ・エディ・シミュレーションの適用を検討する。

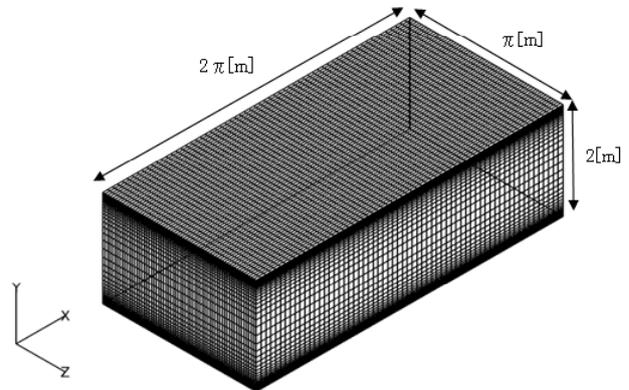
# ダイナミックSGSモデルの検証

## (1)概要

Advance/FrontFlow/MPに実装したダイナミックSGSモデルを検証するために、二流体モデルで1相と2相の物性値を同じにして平行平板間乱流の計算を実施

## (2)計算条件

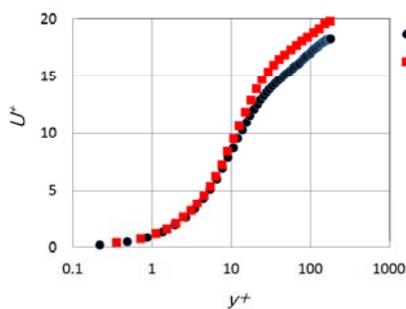
- ・壁面間距離: 2 [m]
- ・主流方向距離:  $2\pi$ [m]
- ・スパン方向距離:  $\pi$ [m]
- ・摩擦レイノルズ数: 180(外力で設定)
- ・レイノルズ数: 5600程度
- ・壁面の境界条件: no-slip条件
- ・主流方向の境界条件: 周期条件
- ・スパン方向の境界条件: 周期条件
- ・節点数: 246,078
- ・要素数: 258,048
- ・乱流モデル: ダイナミックSGSモデルによる  
ラージ・エディ・シミュレーション
- ・時間刻み: 0.001秒で一定
- ・時間積分法: クランク・ニコルソン法
- ・対流項の離散化スキーム: 中心差分



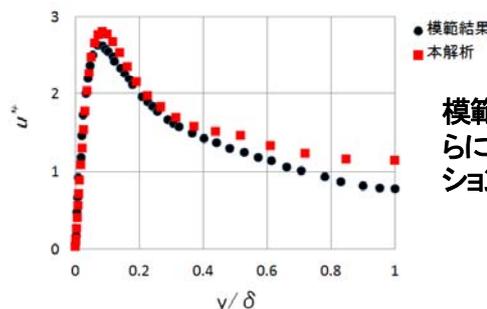
解析領域と計算格子

9

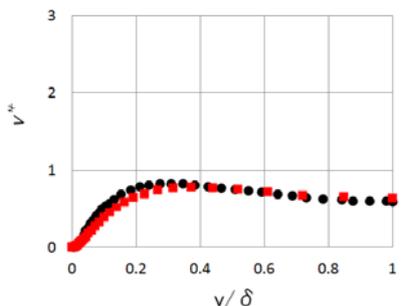
## (3)Kim,Moin&Moser(1987)らによるダイレクトシミュレーションの計算結果(\*)との比較



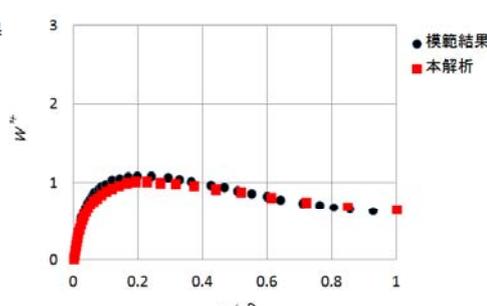
主流方向平均速度



主流方向変動速度のrms



壁面方向変動速度のrms



スパン方向変動速度のrms

模範結果はKim,Moin&Moserらによるダイレクトシミュレーションの計算結果を表す。

(\*)参考文献: Kim,Moin&Moser, 'Turbulence statistics in fully developed channel', J.Fluid Mech,177(1987)133.

10

A-STEPシースズ顕在化タイプの開発では、気液間相互作用に関する Subgrid Scale モデリングを考慮しないで、以下の計算で比較する。

- ・ラージ・エディ・シミュレーション(ダイナミックSGS)
- ・ラージ・エディ・シミュレーション(標準Smagorinskyモデル)
- ・k- $\epsilon$  モデル
- ・乱流モデルなし

## 気液間相互作用に関するSubgrid Scaleモデリングの取り扱いに関する課題(A-STEP実用化挑戦ステージでの開発を提案)

### 単相流

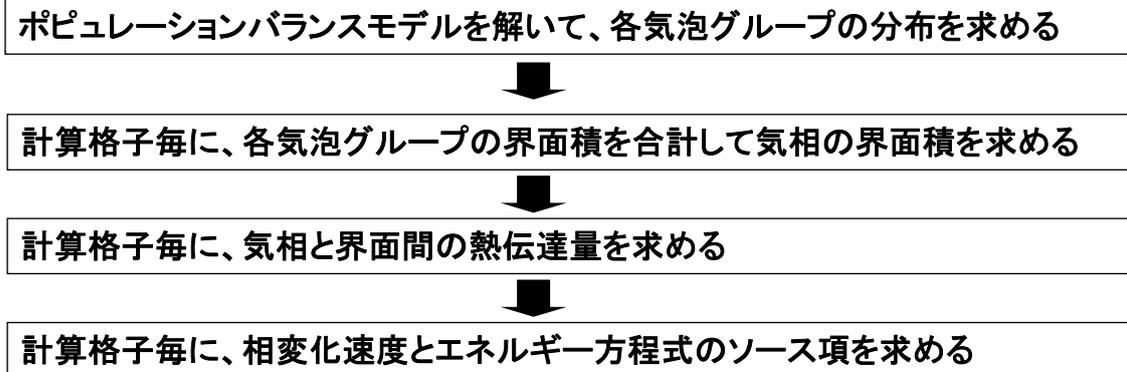
- (1)乱れエネルギーは、カスケード機構により、低波数(大きい渦)から高波数(小さい渦)へ伝達する。
- (2)その伝達は乱流エネルギー散逸率 $\epsilon$ に支配され、高波数で(分子)粘性係数によって粘性散逸する。
- (3)上記を考慮した乱流統計理論などからSubgrid Scaleモデルは確立していると思われる。

### 気泡流

- (1)気泡径が大きくなるにつれて浮力が大きくなり、液体を大きく誘起する。誘起された液体の流動は長波長の流動に成長する逆エネルギーカスケード機構が存在することが知られている。また、気泡径が小さくなるにつれて浮力が小さくなり、気泡は液体に追従するだけになり、液体の乱れエネルギーを減衰させることが考えられる。
- (2)気泡近傍の伴流の影響。
- (3)気泡界面の変形と変動の影響。
- (4)上記の(1)から(3)は、気泡の分布に応じて、離散的に乱れエネルギーを発生させたり吸収させたりする。
- (5)二流体モデルでは気相を連続相として扱うため、格子サイズを、乱れの最小サイズであるコルモゴロフスケールや気泡径や気泡間距離より大きくすることが望ましいが、その範囲を越えた時の影響。
- (6)上記の考慮できる実用的なSubgrid Scaleモデリングを開発する。

## 4.2 気泡径分布の変化の取り扱い

Advance/FrontFlow/MPに導入されている「気泡合体を考慮したポピュレーション・バランス・モデルによる気泡群解析モデル」を相変化に適用できるように改良する。



## 4.3 気泡合体のソースタームの取り扱い

気泡合体のソースタームを表現するためには

- ①乱流運動による衝突頻度
  - ②気泡間に挟まれた液膜が臨界厚さに達するまで2つの気泡が接触している割合
- に対するモデルが必要。

乱流エネルギーの散逸率  $\varepsilon$  がキーとなる。

ラージ・エディ・シミュレーションでは、乱流エネルギーの散逸率を直接求めることができないため、以下のモデルの研究開発を進めている。

- ①標準Smagorinskyモデル、または、ダイナミックSGSモデルで求められる乱流エネルギーとSGS渦粘性係数から乱流エネルギーの散逸率を算出するモデル
- ②ラージ・エディ・シミュレーションの考え方に基づいて、格子サイズと気泡径サイズを考慮するモデル

Prince&Blanch<sup>(1)</sup>は、乱流運動による衝突頻度を

- ①気泡の個数濃度  $n_i$
- ②衝突面積  $S_{ij}$
- ③気泡の変動速度  $u_j$

の関数として次のように表現している。

$$\theta_{ij}^T = n_i n_j S_{ij} (\overline{u_j^2} + \overline{u_j^2})^{1/2}$$

この式に

- ①気泡の変動速度は、気泡径サイズと同程度の液体の変動速度に等しい。
- ②液体の小さい渦運動は、気泡の運動に影響を与えるだけのエネルギーを持たず気泡は、液体の大きい渦運動だけで輸送される。
- ③慣性小領域にある液体の渦運動は、等方性乱流とする。

という仮定を加えて、乱流エネルギーの散逸率を使ってモデル化を行っている。  
本研究では、ラージ・エディ・シミュレーションに適用できるように元の式で定式化を検討している。

また、層流の速度ひずみによる衝突頻度で使用する平均速度の勾配の計算方法もラージ・エディ・シミュレーションで得られた瞬時速度を平均してモデルを構築することも検討している。



#### 4.4 3次元構成方程式、計算時間の短縮化、計算安定性の調査

- ・沸騰などの相変化を伴う場合の3次元構成方程式については、大川富雄研究室でのこれまでの研究成果を中心に3次元構成方程式に適用する方法を検討する。
- ・特に伝熱面から生成される気泡の大きさに着目した実験を重点的に実施する。発表論文を以下に示す。

宮野直樹, 大川富雄, 杉中隆史、沸騰気泡の伝熱面離脱挙動の実験的解明、関東学生会第53回学生員 卒業研究発表講演会、講演番号1402 (2014.3).

宮野直樹, 大川富雄, 杉中隆史、サブクールプール沸騰における蒸気泡挙動の実験観察、日本原子力学会春の年会、講演番号L27(2014.3).

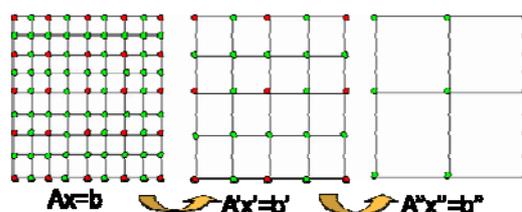


- ・本研究開発で開発するAdvance/FrontFlow/MPのベースコードである Advance/FrontFlow/redにアドバンスソフト株式会社の実装した計算時間の高速化とロバスト性向上の手法と、大川富雄研究室での気液二相流の解析技術に関するこれまでの研究成果から、計算時間の高速化とロバスト性向上のための検討を行う。また、最近の計算高速化技術を調査する。いくつかの例を以下に示す。

## AMG(代数的マルチグリッド)法

AMG法は離散化方程式を解く際に、本来の格子を間引いた仮想格子を作成して、仮想格子系と本来の格子系を交互に計算して、全体の計算速度を速くする方法。以下にAMGの特長を示す。

- ・AMG法が機能する問題に対して、未知数の数をNとすると計算量は $O(N)$ 。
- ・格子数に比例して並列数を増やせば、ほぼ一定時間で収束する。



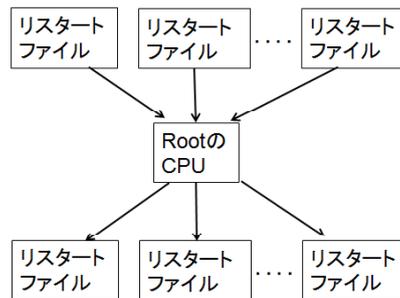
AMGの計算方法

AMG法は市販のソフトにも導入されている機能であり、Advance/FrontFlow/MPにも導入する。

## リスタート計算で並列数を変える機能

並列数を変えたリスタート計算機能を作成して、空いているCPUを有効活用することにより計算を高速化する。

1度rootのCPUに全てのリスタートファイルの情報を読み込んでから次の全てのCPUにbroadcastするとメモリを大量に使用するため、複数回の反復により、リスタートファイルの情報を部分的に読みながらbroadcastして、ローカル変数への割り当て終了したら配列をdeallocateする方法でメモリ使用量を削減する。



リスタート計算で並列数を変える手法

## 前処理で壁面までの距離計算方法の改良

前処理において、空間から最も近い壁面までの距離を計算する手法は、現状では全てのControl Volume に対して、全ての壁要素との距離を計算し最短距離を計算している。

以下の手法に変更して計算を高速化する。

- ①解析領域全体を分割して直方体のブロックに分けて、一つのブロックに数100～1000程度のControl Volume が含まれるようにする。
- ②各壁要素と分割直方体との最大、最小距離を計算する
- ③直方体との最大距離が例えば10cmの壁要素があれば、その壁要素と直方体に含まれるControl Volume との距離はすべて10cm以下になるので、直方体との最小距離が10cmより大きな壁要素は距離計算するまでもなく計算対象から外す。
- ④直方体との最小距離が、上記の例では10cm以下の壁要素だけ取り出して、その直方体内部のControl Volume との距離計算をする。
- ⑤大規模になるほど高速化率がアップし、500万要素では現状から100倍以上の高速化が期待される。

## 前処理の省メモリ化

前処理においてmetis による領域分割計算時のメモリ使用量を削減することにより、1ノードだけ多くのメモリを搭載する必要がなくなります。

テストを行った結果、320万要素でメモリ使用量を6.4GBから0.76GBまで削減することができた。

このメモリ使用量は並列数には関係しない。

## 時間刻み、緩和係数、収束判定基準値、反復回数の最適化

時間刻みについては自動的に拡大する手法を構築する。

緩和係数の最適化を行う。

収束判定基準値(外部反復と行列解法の両方)の最適化を行う。

反復回数の最適化を行う。

数値パラメータに対するユーザーの負担をなくす。

## ソースタームの線形化

ソースタームを線形化して、行列の優対角化を行うことによりロバスト性を向上させる。

相変化を伴う二流体モデルで使用する様々なソースタームについて、線形化の手法を検討する。

## 5. A-STEP実用化挑戦ステージの提案

### 5.1 目標

世界トップレベルの実用的な汎用3次元気液二相流解析プログラムを開発する。

### 5.2 開発するソフトウェアの内容

- ①計算速度を100倍短縮する。
- ②ロバスト性(計算安定性)が高く、必ず計算結果が出る。
- ③ユーザー企業が機器の設計や研究開発で活用できるまでの計算精度が保障される。
- ④流体解析の知識がないユーザーでも簡単に計算の実行と計算結果の可視化を行うことができる。
- ⑤物性値(温度や圧力の依存性)や構成方程式や数値パラメーターが自動で適切に設定される。

# 謝辞

ご清聴ありがとうございました。

科学技術振興機構様には、平成25年度A-STEPシーズ顕在化タイプ「相変化を伴う3次元気液二相流解析プログラムの研究開発」の申請を採択していただきまして、誠にありがとうございました。

ご来場の皆様ならびに科学技術振興機構様には、今後ともご支援の程何卒よろしくお願い申し上げます。



アドバンスソフト(株)気液二相流解析セミナー、2014年6月10日

# 気液二相流の課題と今後の期待

---

大川富雄(電気通信大学)

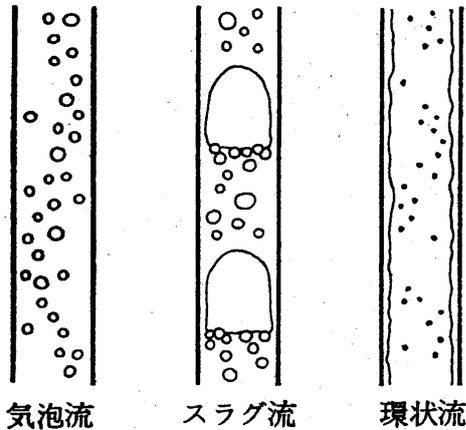
Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

## 主な内容

- はじめに
  - 気液二相流の多重スケール構造について
- 気液二相流解析モデル
  - 解析モデルの概要及び特徴(長所/短所)
  - 解析モデルの選択
  - 主な課題
- 沸騰流解析における課題
- まとめ

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

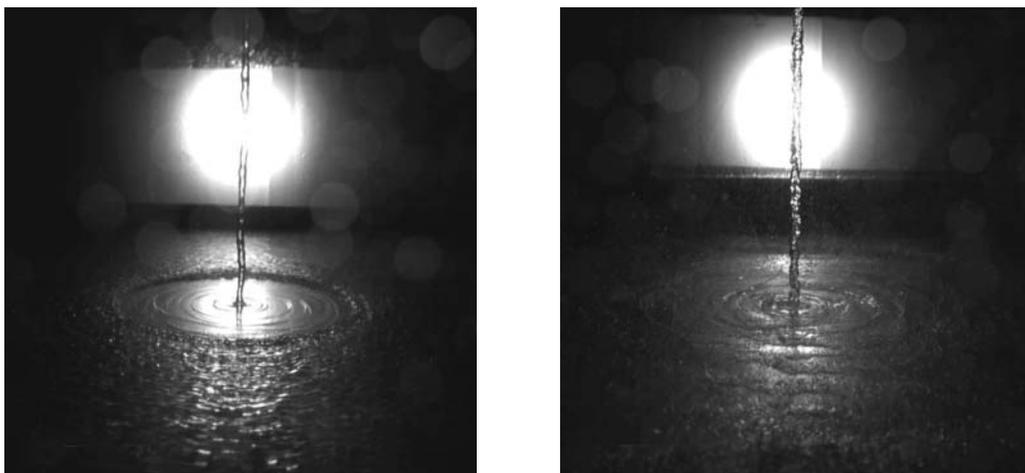
## 気液二相流の空間スケール(管内流)



- 気泡
  - 沸騰気泡: 0.1-1 mm
  - 水・空気系気泡: 1-10 mm
  - スラッグ気泡: 10-100 mm
- 液膜
  - 厚さ: 0.1-1 mm
  - リップル波、擾乱波: 1-10 mm
  - 擾乱波間隔: 10-100 mm
- 液滴
  - 液滴径: 0.01-0.1 mm
- システム応答 ~ 1,000 mm

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

## 多重スケール(衝突噴流の例)



- ノズル直径: 10mm、突出圧: 0 kPa(左: 自由落下)、50 kPa(右)
- 液体噴流側面における界面波の形成、液滴生成
- ターゲット上での液膜形成、界面波、液滴生成
- **液シート厚さ、飛散液滴サイズは、噴流直径よりはるかに小さい!**

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

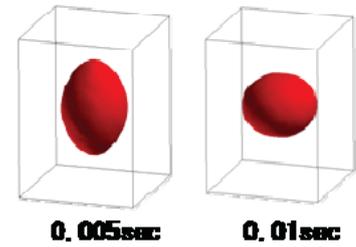
## 様々な数理モデル～多重スケールに応じて…

### ・瞬時局所の式(平均化せず気液界面を追跡)

- ・VOF, Front tracking, Level set, 粒子法, etc..

### ・平均化方程式

- ・混合流モデル(気液間速度差相関式)
  - ・均質流モデル: 気液間の相対速度を無視
  - ・スリップ流モデル: スリップ比 $S$ で気液間相対速度を表記
  - ・ドリフトフラックスモデル: 分布定数 $C_0$ とドリフト速度 $V_{gj}$ で表記

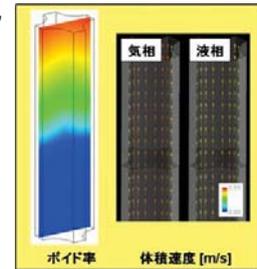


### ・二流体(多流体)モデル

- ・相間運動量輸送を介して気液間相対速度を表記
- ・一次元⇔多次元

### ・粒子追跡法

- ・One way法, Two way法



(画像: アドバンスソフトホームページより)

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

## 各モデルの特徴

モデル	長所	短所
界面追跡法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・瞬時局所の式に基づく(気液界面をダイレクトに計算する)ので、高解像度かつ相関式依存度低であり、原理的に高精度解析が可能。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最小空間スケールの空間分解能が必要で、計算時間が膨大(局所詳細メッシュ有効な場合も)。</li> <li>・気泡合体や沸騰核など、ミクロスケール現象はモデル化が必要。</li> </ul>
混合流モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低計算負荷。</li> <li>・高速流解析や定常システム系統解析に有効。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・基本的には一次元・定常解析用</li> <li>・混合がきわめて良い場合(単相流的に取扱い可能な場合)を除いて、多次元解析や非定常解析には不向き。</li> </ul>
二流体モデル(1D)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低計算負荷。</li> <li>・非定常を含めてシステム解析に有効。</li> <li>・相関式がよく整備されている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・複雑形状流路など、多次元性の強い場には不向き(相関式の開発困難)。</li> </ul>
二流体モデル(3D)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現実的な計算負荷で、複雑形状流路内二相流など、多次元かつ非定常の問題を解析可能。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・気泡流以外(特に環状噴霧流)への適用例は少ない。</li> <li>・相関式開発が必ずしも容易でない(多くの相関式は一次元解析用で、空間スケールが必ずしもマッチしない)。</li> </ul>
粒子追跡法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・液滴、気泡合体などの素過程について、高度な相関式を導入しやすい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高度な相関式の整備は容易でない。</li> <li>・分散流以外に適用できない。</li> </ul>

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

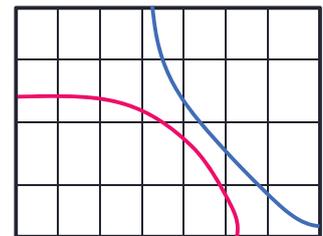
## 解析モデルの選択

- 一次元解析で足りる場合 → **一次元二流体モデル**
- 多次元解析が必要な場合
  - **界面追跡法** (瞬時・局所の式)
    - 流下液膜やスロッシングのように、気液界面がはっきりしている場合。
  - **多次元二流体モデル** (平均場方程式)
    - 気泡塔のように気液の混合が比較的良い場合。
    - 沸騰を伴う場合。

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

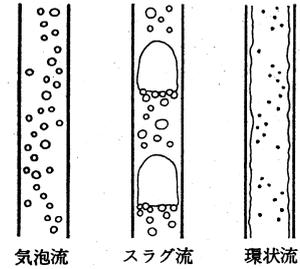
## 界面追跡法の課題

- 計算負荷対策
  - 界面近傍へのメッシュ自動集中配置、並列計算、etc..
  - 液膜流解析では高アスペクト比の計算メッシュ
- 三相界線 (動的接触角)
  - 固体面上における液膜 (塗料や溶融燃料など) の広がり挙動
- 気泡合体
  - 界面追跡法の利点の1つは、気泡径モデルを必要としないこと。
  - VOF ~ 界面が近づけば合体してしまう (気泡流中で、気泡反発はありふれた現象だが..)。分子レベルのモデリング。VOFではなく、界面自体を追跡することが必要?
- 相変化
  - 蒸発・凝縮 ~ 温度境界層の解像 AND/OR モデリング
  - 沸騰 ~ 沸騰核、気泡生成周期 (待ち時間)



Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

## 多次元二流体モデルの課題



- 一次元用構成式の適用性に関する問題
  - 気泡の抗力係数: 終端速度より導出・・水平方向に適用できるか?
  - 例えば、Lockhart-Martinelliと壁面せん断力モデルの整合性 ( $j_G, j_L$ )
  - 気泡径分布の取扱い
  - 乱流モデル ( $k-\varepsilon \rightarrow$  LESによる一般性の向上)
- 環状流解析に適用できない(蒸発管の一貫解析)
  - 液膜の表現(気泡流ボイド率のWall Peak解析におけるせん断揚力)
  - 環状流への遷移に関する知見が少ない(液滴流量比すら不明)
  - 液膜と液滴の分離・・多次元三流体モデルはあり得るか?
  - より一般的には4流体モデル(連続気相、連続液相、気泡、液滴)?
- 沸騰のモデリング

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

## 沸騰における蒸気生成率

- 飽和沸騰の場合
  - 熱流束既知・・  $\Gamma_V = q_W / \Delta h_V$  [kg/m<sup>2</sup>s]
  - 壁面温度既知(熱交換器含む)・・  $\Gamma_V = h(T_W - T_{SAT}) / \Delta h_V$  [kg/m<sup>2</sup>s]
  - DNB発生時の壁面温度急上昇時など、特殊な場合を除けば、入熱は沸騰による蒸気生成に消費される。
  - 課題: 熱伝達率相関式や初期気泡径相関式等の高精度化
- サブクール沸騰の場合
  - 入熱  $\rightarrow$  「液温上昇」と「蒸気生成」に消費される。
    - 沸騰による蒸気生成量の予測が既に難しい。
  - 温度分布: 加熱壁近くは過熱状態  $\leftrightarrow$  バルク液はサブクール状態
    - 生成後の軌跡によって、気泡は過熱液相中で「さらに成長」する場合も、サブクール液中で凝縮によって「消滅」する場合もある。
    - 凝縮量の予測も困難。

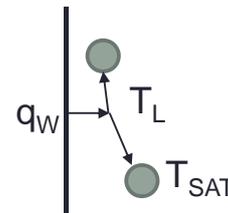
Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

## サブクール沸騰モデルの目標

- 気泡径やボイド率の精度を議論する以前に、蒸気生成量の予測が容易でない。
  - ⇔ 水・空気系で、ガス流量を知らずにボイド率予測はできない。
  - 蒸気生成量の合理的予測。
- 生成直後に凝縮・消滅する場合と、長期間存在し続ける場合がある。
  - 界面熱伝達率は、Ranz-Marshall的でオーダーは大丈夫。
  - 液相の参照温度は、飽和温度(場合によっては過熱)からバルク温度まで幅があり、気泡軌跡の影響を受けるため、予測困難。
  - 凝縮量評価のための液相参照温度(気泡軌跡)の合理的評価
- 上記を満足した上で、初期気泡径や合体の合理的評価
  - 界面追跡では自動計算の可能性。二流体モデルではモデル化必須。

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

## 蒸気生成量の評価法



- Lai & Farouk (IJHMT 1993) の方法
  - すべての熱流束を液相に投入 → 気液界面熱伝達を介して蒸気生成
  - 初期ボイドがないと沸騰しない。
  - 界面熱伝達率や気泡径で、ボイド率を調整可能(長所と見ることもできるが、伝熱面表面性状の影響もこの辺りで考慮することになる)
- Kurul & Podowski (IHTC 1990) の方法
  - $\Gamma_v = N_s \times f_b \times p_b \times V_b$  の関係を用いて、算出。
  - 「沸騰核密度」、「気泡生成周期」、「初期気泡径」の相関式が必要
  - より現実に即したモデル化の方法だが、十分な精度の相関式を準備できるのか？

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

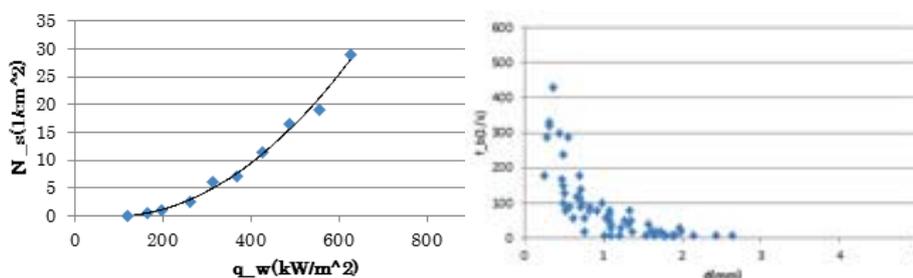
## 沸騰核密度等の相関式の一例

- $N_s = 1.5 \times 10^4 \Delta T_w^{1.8}$  (Del Valle & Kenning 1985)
  - 過熱度のみの関数
- $d_{b,ini}$ : 過熱度、サブクール度、液速度の関数 (Unal 1976)
  - 気泡形成過程を観察した訳ではない; 単一値
- $f_b = K d_{b,ini}^{-0.5}$  (Ceumern-Lindenstjerna 1977)
  - 気泡径の増加とともに減少; 単一値

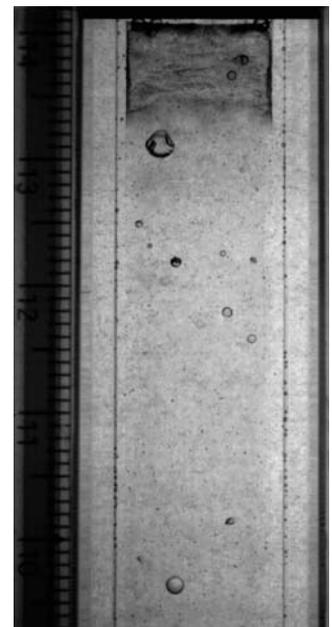
Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

## サブクール沸騰の高品質観察に成功

- 画像解析により、 $N_s$ ,  $d_{b,ini}$ ,  $f_b$  の正確に計測
  - 沸騰核密度: 熱流束あるいは過熱度の増加とともに増加傾向だが、気泡生成状況はサイトによって大きく異なる。無視すべきサイトも多い。
  - 気泡径: サイトにより0.2~3mm程度に分布(各サイトでは割と均一)
  - 気泡周期:  $f_b d_{b,ini}$  = 一定は成立 ⇔ 不安定なサイト(無視すべきサイト)も。
  - 相関式では・・・
    - 「注意深い平均化」または「気泡径分布の考慮」が必要
    - $N_s$ ,  $d_{b,ini}$ ,  $f_b$  はセットで計測しないと危険。



Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications



## 気泡軌跡 (Ahmadi et al., IJHMT 2012a)

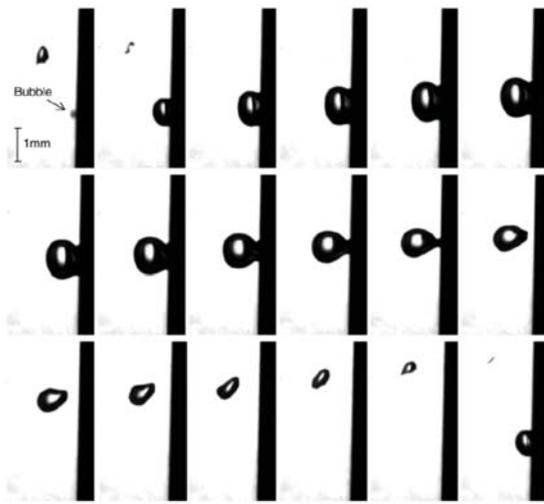


Fig. 4. Bubble lift-off from the heated surface observed in Run 8 (time interval is 0.67 ms).



Fig. 5. The bubble sliding along the heated surface for a long distance observed in Run 15 (time interval is 3.33 ms).

- Lift-off または Sliding (沸騰核に留まるのは珍しい)
- 軌跡によって、気泡の寿命(ボイド率)は大きく異なる。

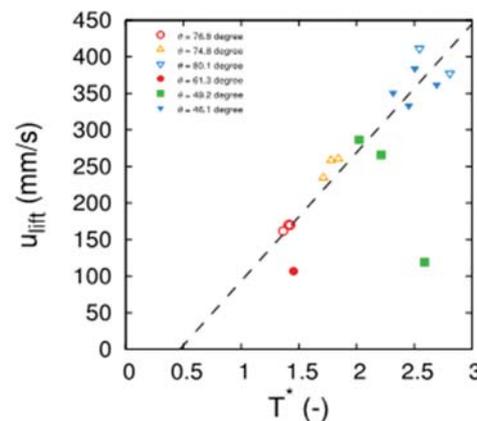
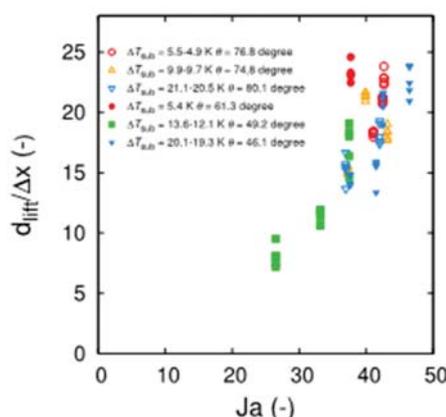
Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

## なぜ Lift-off するのか？

- まだ揺らいているが、Growth Force が最有力
- 壁面上で成長する球形気泡に働く非定常力

$$F_{Growth} = -\pi\rho_l r_b^2 (2\dot{r}_b^2 + 0.667r_b\ddot{r}_b) \quad (\text{Thorncroft 2001})$$

- $r_b \sim t^{0.5}$  なら Lift-off 抑制だが、成長速度が急低下して Lift-off を促進
- 気泡径 → 過熱液層厚さ、Lift-off速度 → 気泡成長速度でスケーリング



Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

## サブクール沸騰域におけるボイド率発展

- サブクール度を徐々に下げると・・・
  1. 非沸騰
  2. 沸騰開始 (ONB)
    - しばらくの間、ボイド率は無視得るほど。
  3. ボイド率の実質的増加開始 (NVG)
    - ボイド率急上昇
- PNVGの前後で何が違うのか？
  - NVG前: 気泡が沸騰核に付着した状態のため、蒸気生成が行えない。
  - 気泡の沸騰核離脱によりNVG
  - Levy の Force balance モデル
  - **観察結果と整合しない！**

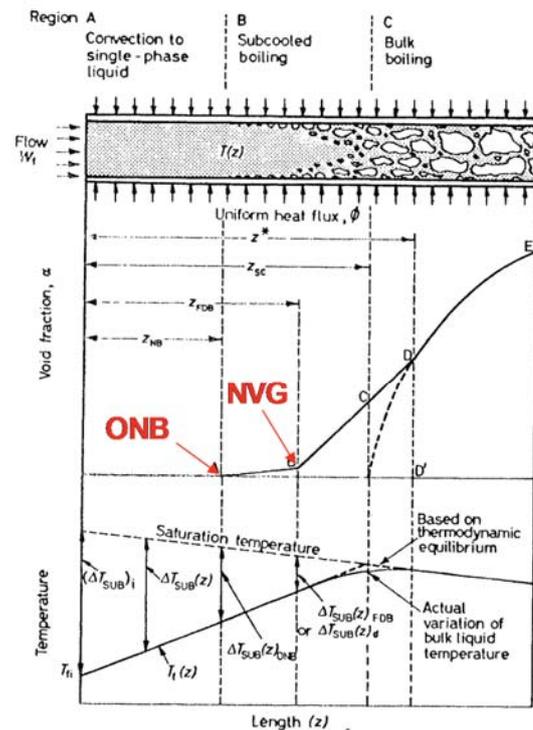


Fig. 6.1. Void fraction in subcooled boiling.

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

## NVGの起因事象(水、大気圧、高濡れ面)

- 気泡が再付着すると、気泡の寿命が著しく延びる(Ahmadi et al. IJHMT 2012b)
  - この実験ではこれが NVG の起因事象(高圧では異なる)。
- なぜ再付着するか？
  - 「乱流渦との相互作用」または「気泡合体(こちらが支配的)」による気泡のランダム運動(せん断揚力ではない)
- モデル化
  - 粒子追跡型なら容易
  - 確率的な現象のため、二流体モデルでは検討必要

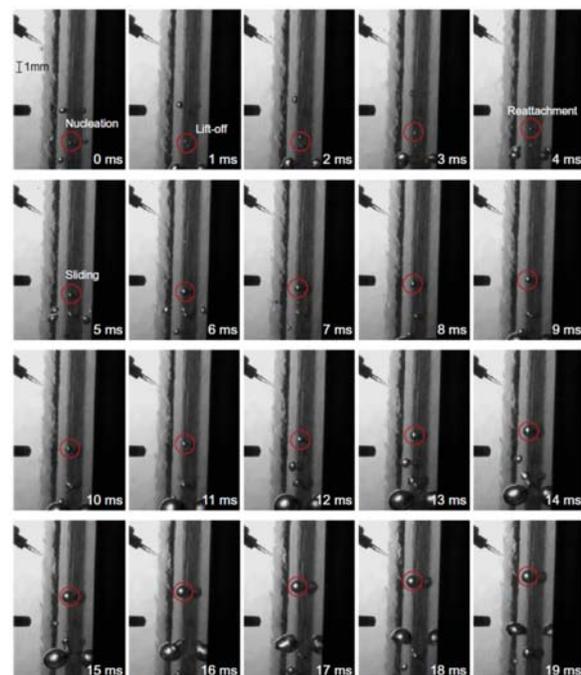


Fig. 6. Process of the bubble reattachment to the heated surface after the lift-off (Run 108).

Energy & Environment Laboratory, The University of Electro-Communications

## まとめ

- 気液二相流解析の数理モデル、特徴、課題を概観した。
- 沸騰を伴う二相流解析の課題を抽出した。以下が必要。
  - 有効沸騰核密度の相関式
    - 発泡核はそれぞれ違う。なんとなく数えるだけでは足りない。
  - 生成気泡の径分布
    - 気泡径に関するポピュレーションバランスモデル必須
  - 適切な平均化操作に基づく平均気泡径相関式と気泡生成周期相関式
  - 発泡直後の非定常状態に適用可能な気泡挙動モデル
    - 気泡核付着？ スライド？ リフトオフ？
  - 気泡合体など、低頻度だがマクロに影響大の事象のモデリング
    - 気泡追跡型にしたくなるが、二流体モデルでどのように取り込むか？

## 謝辞

- 本講演は、下記のプロジェクトで得られた成果を含みます。
  - 原子力システム研究開発事業(MEXT):「ミリチャンネル二相熱流動場の高信頼性予測実現のための研究開発」、2005～2007年度.
  - 科学研究費補助金・基盤研究B:「稠密・高出力密度軽水炉の成立性評価に資する機構論的沸騰二相流解析技術の開発」、2008～2010年度.
  - 受託研究(JNES):「システムコードの2圧力化及びサブクール沸騰モデルの開発」、2013年度.
  - 共同研究(IEA):「格納容器内デブリ分布状況の高信頼性評価に資する液体噴流の流動特性に関する研究」、2013年度.
  - 研究成果最適展開支援プログラム(JST):「相変化を伴う3次元気液二相流解析プログラムの研究開発」、2013～2014年度
- ご清聴ありがとうございました。
  - 沸騰流解析でやるべきことは理解できてきた気がします。
  - ご支援いただければ幸いです。





**警告**

このレポートに収録されている文章および内容については、ご自身のために役立つ用途に限定して無料配布しています。  
このレポートを、販売、オークション、その他の目的で利用するには、著作権者の許諾が必要になります。  
このレポートに含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。